KSK-GH22-3

平成22年度　製造業の基盤的技術の拡充強化に関する
研究等補助事業

加工技術高度化に関する研究
－ガラス加工用バインダレス cBN の成形－

平成 23 年 3月

財団法人　機械振興協会　技術研究所

加工技術高度化に関する研究

—— 目　　次 ——

<研　究>

ガラス加工用バインダレス cBN の成形

飯塚　保※

Binder-less cBN Tool for Glass machining

Tamotsu IIZUKA

1. はじめに

ガラスは建築資材，光学部品，家電品，医療機器，さらには食器に至るまで身近な工業製品に多用されている．本研究は，ガラスの加工に焦点を合わせ，切削用工具としてのバインダレス cBN の成形に関するものである．

GfK ジャパン(ジーエフケー マーケティングサービス ジャパン 株式会社：市場調査会社)が2011 年 1 月 13 日に「GfK Certified 2010」を発表した [1]．この発表は全国有力家電量販店の販売実績より算出したデータに基づき，家電・パソコン関連 57 カテゴリーの販売結果をまとめたものである．これによると，レンズ一体型デジタルカメラは上位 3 社で 49.9%のシェアを占めている．また，レンズ交換型デジタルカメラ(デジタル一眼レフ)では，上位 3 社のシェアは 75.6%である．

同様に株式会社 BCN では「BCN AWARD 2011」（全国の量販店の POS データを日次で収集・集計した「BCN ランキング」に基づき，パソコン関連・デジタル家電関連製品の年間（1 月～12 月）販売台数第 1 位のベンダーを表彰する賞）を発表している [2]．これによると，レンズ一体型デジタルカメラ上位 3 社のシェアは 48.1%，レンズ交換型デジタルカメラは上位 3 社で 74.5%のシェアを占めている．調査会社によって数%値が異なるが，上位 3 社で半数およびそれ以上の市場を占めている．これらのデジタルカメラには非球面レンズが採用されており，従来技術の研磨では生産できない．高度な加工技術が要求されるので，供給可能な企業は限られ，技術を持つ企業が寡占することになる．パナソニック株式会社のホームページでは非球面レンズの解説に「当初，非球面レンズは高精度な研削，研磨技術が必要な高価なレンズであった．しかし，Panasonic は金型を使ったモールド成形の実用化で量産に対応．もちろん，高度な設計技術や品質管理が要求される高性能レンズであることには変わらない．」と記述している [3]．以上のように，非球面レンズの量産はモールド成型が主流である．また，モールド成型はガラスを加熱・軟化させて塑性加工を行うため，金型には高温・高圧での耐久性(耐摩耗性)を備えた難加工材料が使用される．さらに，金型には高い形状精度が要求されるために超精密加工を施す必要がある．そのため，高いコストと加工時間が要求される．以上より，モールド成型では高価な金型が必要となるため，非球面レンズの試作や小ロットの生産には適さない．CNC 超精密旋盤によるガラスの延性モード切削ならば，NC プログラムによって非球面形状は創成可能となる．そのため，非球面レンズは球面レンズの追加工などで製作可能となり，金型は不要である．

一方，スマートフォンと呼ばれる通話機能以外にインターネット利用やスケジュール管理などの機能も併せ持った，多機能な携帯電話がある．このスマートフォンが通常の携帯電話のシェアを奪いつつある．前述の「BCN ランキング」によると，2010 年 12 月の携帯電話全体の販売台数に占めるスマートフォンの割合は，11 月の 35.5%から 12.6 ポイント増の 48.1%まで上昇した．また，価

※ 生産技術部　加工技術課

格.com ID 登録ユーザーの1万360人に調査した結果，全体の3割弱となる29.3%がスマートフォン所有者ということである．このスマートフォンは携帯電話とパソコンの中間的な存在であり，ディスプレイサイズは通常の携帯電話のそれよりも大きい．また，ディスプレイはタッチパネルが標準であり，素材はガラスのみならず樹脂にシリカ(SiO_2)を添加して強化したものなどがある．

ダイヤモンド工具でガラスの切削を行うと，工具摩耗が激しく，加工精度・加工コストに悪影響を与える．シリカを添加した樹脂材料も同様にダイヤモンド工具の摩耗が激しい．ダイヤモンドに次いで硬度の高いcBNならば，ダイヤモンドの欠点を補える．しかしながら，ガラス加工に適したcBN 工具の形状は不明である．また，バインダレスcBNは加工が困難であり，平滑な表面を得ることが難しい．昨年度に行ったバインダレスcBNのスカイフ盤を使用した研磨実験では，同じ研磨条件では単結晶ダイヤモンド，超硬合金(K10 相当)と比較すると表面粗さが低く[4]，光沢のある表面は得られなかった．

また，理学・医療機器に使用されるマイクロリアクタでは，滞留状態や流動状態の制御に流路(チャンネル)の断面形状やテーパー，蛇腹などの流路形状が要求される[5]．エンドミル加工では流路の形状は軸対称に限られるが，フライカットでは工具形状が転写されるため，形状自由度が高い．

当研究所で行っているフライカットによるガラスの延性モード切削加工では，加工面の品質は光学機器に使用できるレベルには達していない．この加工面の品質向上には，工具と加工条件が重要であることは過去の実験において確認している．そこで，加工面品質向上のため，工具の品質向上を主眼においてバインダレスcBN工具の成形に関する研究を行う．これらの加工実験を主体とした研究により，硬脆材料の超精密加工に向けた問題点を顕在化させ，その解決法および問題点克服につながる基礎的なデータ取得を行う．

2．ガラス

2.1 ガラスの歴史[6,7]

現存する最も古いガラス製品は約5,000年前に作られたものである．ガラスの発見(発明)はその頃と考えられるが，2説ある．一つは2,000年前の科学技術の書物に出てくる話で，言い伝えを文章にしたものである．フェニキアのソーダ商人がソーダ灰の袋をかまどにして調理をしていると，砂と混じったソーダ灰が融けて半透明な石のようなもの(ガラス)ができあがった．商人はこれを商品とし，ガラスの製造につながったとする説である．他方は，5,000 年前の高温技術に基づく推論である．この時代には青銅器の精錬のために 1,100℃以上の高温を得る技術が成立しており，陶器を焼くための窯もあったと考えられている．陶器は素焼きの素地に釉薬をかけて製作されるが，融け落ちた釉薬の塊を陶磁器職人が価値のあるものとして取り上げてガラスが始まったとする説である．このガラス製造の技術はエジプト，ローマ，ペルシャを経てヨーロッパ全体に広がり発展した．また，中国でも紀元前5世紀から2世紀の戦国時代には，すでにガラスが作られていた．この中国のガラスはメソポタミアやエジプトとは成分が異なるので，独自の方法で作られたといわれている．日本では，弥生時代にガラスが装身具として伝えられ，平安時代まで使われていた．

ガラスは瓶や水差しなどの装飾品からステンドグラス，シャンデリア，鏡などの光を透過・屈折・反射する性質が重要視されて発展して来た．また，ガリレオ・ガリレイ(1564年～1642年)によってガラスレンズを使った天体望遠鏡が作られ，ガラスは科学技術を支えるようになり，現在に至っている．

2.2 ガラスの定義[8]

一般に，物質は高温では気体，中間温度では液体，低温では固体となる．これは，それぞれの温度範囲でそれぞれに状態が熱力学的に安定となるからである．例えば，水は一気圧では100℃以上で水蒸気(気体)，0-100℃で水(液体)，0℃以下で氷(固体)となる．気体と液体は一定の形状を有してない．液体は，体積は定まっているが形状は容器に応じて変化する．したがって，液体の分子は並び方が定まっていない．これに対し，固体は時間が経過しても形状は変化しない．すなわち，原子・分子の

並び方は変わらない．熱力学的に最も安定な個体は原子，分子が規則的に並んでいる結晶であるため，物質の3態のうち固体は結晶のことである．

したがって，ガラスの定義は結晶との対比で行われる．また，従来から工業的に使用されている板ガラス，壜ガラス，あるいは光学ガラスなどのいわゆるガラスに特有の性質に基づく定義が必要になる．ここでは，次の2つの条件を満たす固体をガラスと定義する．

(1)原子配列がX線的に不規則な網目構造を持つ．
(2)ガラス転移現象を示す．

(1)はガラスが構造上非晶質であることを示している．図2.1に結晶とガラスの構造を比較する模式図を示す．図2.1の(b)は不規則網目で(a)の結晶と比較すると，全体にわたって原子が不規則に配列している．このモデルをガラスの網目構造とする説は不規則網目構造説と呼ばれ，サッカリアゼン(Zachariasen)によって提唱され，ウォレン(Warran)，スン(Sun)をはじめ多数のガラス研究者によって支持されて現在に至っている．図2.1の(c)は微結晶構造説に基づく不規則構造モデルである．図(c)の中で破線で示した領域Cが微結晶部分である．微結晶の大きさは20Å以下で，その構造は図のように少ないものから微結晶どうしが接触する程度に多いものまである．このような微結晶をつなぎ合わせて固体とするためには多かれ少なかれ非晶質のマトリックス部分が存在する必要がある．微結晶の向きが不規則であるため，微結晶が小さければ，ガラスのX線非晶質性，等方性，透明性，その他の物性を不規則連続網目構造説と同様に説明できる．微結晶説はRandallらによって提唱され，Porai-Kosgitsはこの説を改善した．また，SiO_2ガラス，非晶質のGe，Si，C，金属ガラスなどのX線的に非晶質の材料の電子顕微鏡暗視野像中に明るいスポットが観察され，これが微結晶存在の証拠であるとされているが，このコントラストは不規則連続網目構造モデルでも説明できるとの意見もあり，この問題の解決は容易ではない．

(2)は非晶質の中で特にガラスといえる物を区別する条件である．従来のガラスはすべてガラス転移現象を示す．すなわち，ガラス転移温度T_gが存在する．図2.2に示すように，ガラスを加熱すると膨張するが，ガラス転移温度と呼ばれる温度でガラス化過冷却液体に変わって膨張の仕方が大きくなる(膨張係数が大きくなる)．これがガラス転移現象である．過冷却液体を冷却するときには，逆に液体がガラス転移温度で固体のガラスに変化する現象がガラス転移現象である．ガラス転移温度T_gは融点T_mの2/3に近く，また，T_gではガラスの種類にかかわらず粘度が10^{13}P(ポアズ)に近い値をとる．

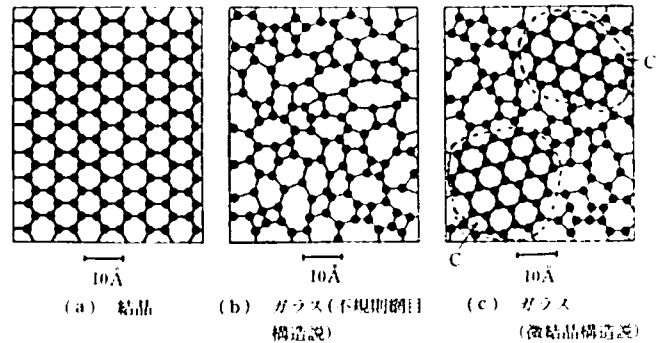



図2.1 結晶，不規則網目構造によるガラス，微結晶構造によるガラスの構造モデル

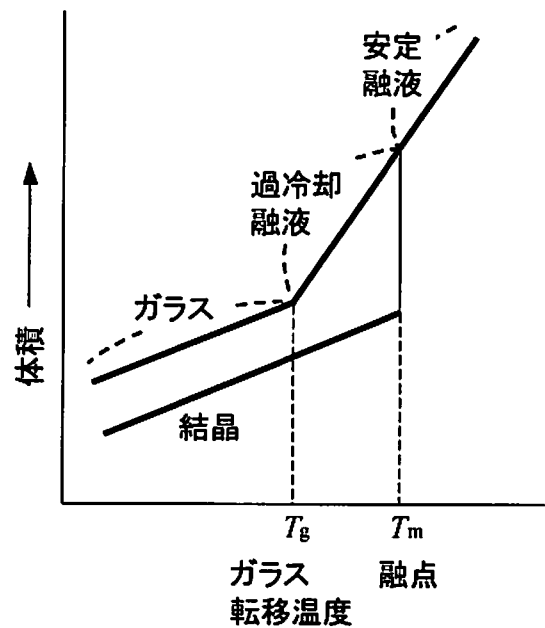



図2.2 ガラス転移温度と体積変化

ガラス転移温度は熱膨張係数が変化する温度として求められるほかに，比熱が変化する温度としても求められる．いずれの方法によっても，ある非晶質にガラス転移現象が認められれば，その非晶質はガラスと呼んで良い．一方，ガラス転移現象が認められなければ，非晶質と呼ぶべきである．

ガラス工業および工学の分野では，ガラスとは溶融物が結晶化することなく冷却した無機物質という定義が与えられている．しかし，この定義では現在は工業的にも問題がある．蒸着，スパッタリング，CVD，ゾルーゲル法など溶融以外の新しい方法で溶融によるものと全く同じガラスを作ることができるからである．また，無機物質と異なる金属や高分子でもガラスとなる．したがって，この狭い定義ではなく，非晶質でガラス転移現象を示す物質をガラスと呼ぶのが適当である．

3．加工方法および加工装置・機器

3.1　ガラスの延性モード切削

硬くて脆い材料(硬脆材料，硬脆性材料)は，ガラス，単結晶 Si，セラミックスなどが代表的である．これらの材料は加工が困難な難加工材料でもある．これらの材料に金属同様の加工条件で切削加工を試みると，容易に割れ(脆性破壊)が発生してしまう．しかしながら，切取り厚さを微小(0.1 μm 以下)にすると金属同様の加工(延性モード加工)が可能になる．この現象は良く知られており，多くの研究がなされている [9-12]．この延性モードによる切削では，金属同様に流れ型の切りくずが発生し，クラックなどの脆性破壊は発生しない．また，加工モードの変化に対する脆性-延性遷移に着目した研究も多い [13-15]．延性モードが脆性モードに変化する切込み量(切取厚さ)は臨界切込み深さ dc と呼ばれる旋剤による延性モード切剤では，切込み深さは臨界切込み深さを上回ることができない(図 3.1 参照)．この値は材料や加工条件によって変化する．

延性モード切削による加工では，切取り厚さを dc 以下の微小な値に保持しなければならず，加工能率は非常に低い．そのため，レンズなどの光学部品を延性モードによる旋削加工で生産することは，経済的に成立しない．また，単結晶ダイヤモンド工具でガラスを切削すると工具摩耗が激しく，さらに経済性を低下させる要因となる．そこで，延性モード切削で加工能率を高める手法の確立が必要となり，旋削加工以外の加工方法を試みることにした．フライス加工と同様に工具を回転させるフライカットならば，研削加工と同様の加工メカニズムによってガラスの延性モード切削が可能になると考えた．そのため，当研究所で開発した超精密旋盤をフライカットが可能になるように改造し，ガラスの延性モード切削を実現した．

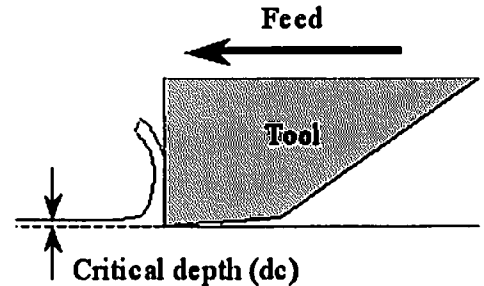



図 3.1　臨界切込み深さ (dc)

3.2 フライカット

フライカットは回転工具を持つフライス加工と類似した加工方法である．除去される部分(切りくずとなる部分)は，回転工具の軌跡となるトロコイド曲線で囲まれた扇形である．一般のトロコイド曲線は以下の式で表される．r_m は動円の半径，r_m は描画点の半径，θ は回転角を示す．

$$X = r_m\theta - r_d \sin\theta$$
$$Y = r_m - r_d c \cos\theta$$

フライス加工の場合では，r_m は一回点当りの送り量となり，r_d は工具の回転半径となる．トロコイド曲線の描画例を図 3.2 に示す．アップカット(a)とダウンカット(b)では，r_m および r_n の係数は同じだが，回転方向が異なる．

フライカットでは，仕上げ面は切りくずが dc 以下の薄い部分で延性モードによる加工となる．そのため，ガラス加工において旋削と比較すると延性モード加工が容易に実現でき，切込み深さは dc を大幅に上回るため加工能率も高い．

超精密旋削以外のガラスの切削加工では，エンドミルを用いるフライス加工の研究がある [16]．松村らによる研究において，前述のようにフライス加工の加工メカニズムは旋削加工より高能率にガラスの延性モード加工が実現可能であることが示されている [17-18]．

フライカットは主軸先端に回転軸と直交する方

向に旋削工具を取付けてガラスの加工を行う．フライカットの加工メカニズムはフライス加工と同一である．そのため，高能率なガラス切削が期待できる．以下にエンドミル加工とフライカットの利点を示す．

(1) エンドミルの溝加工ではアップカットとダウンカットが混在する．フライカットではアップカット，またはダウンカットの一方を選択できる．

(2) エンドミル加工は加工幅と工具直径が同一，またはそれ以下となる．フライカットの加工幅は工具軸径に依存しない．そのため，軸を大径化して剛性を高められる．

(3) エンドミルによる溝加工では，加工形状は軸対象となる．フライカットの加工形状は工具形状が投影された形状になるため，応用範囲が広い．

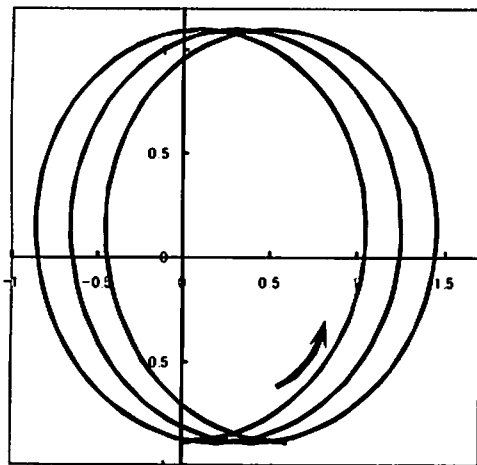
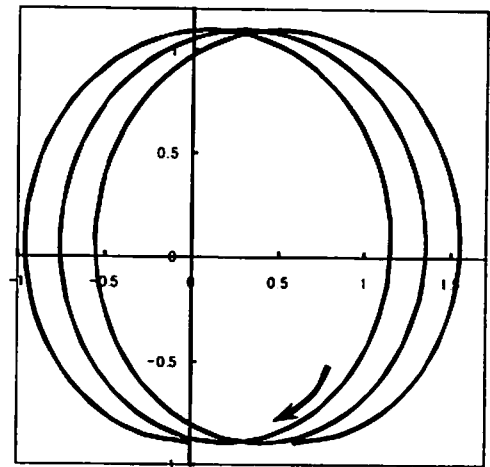
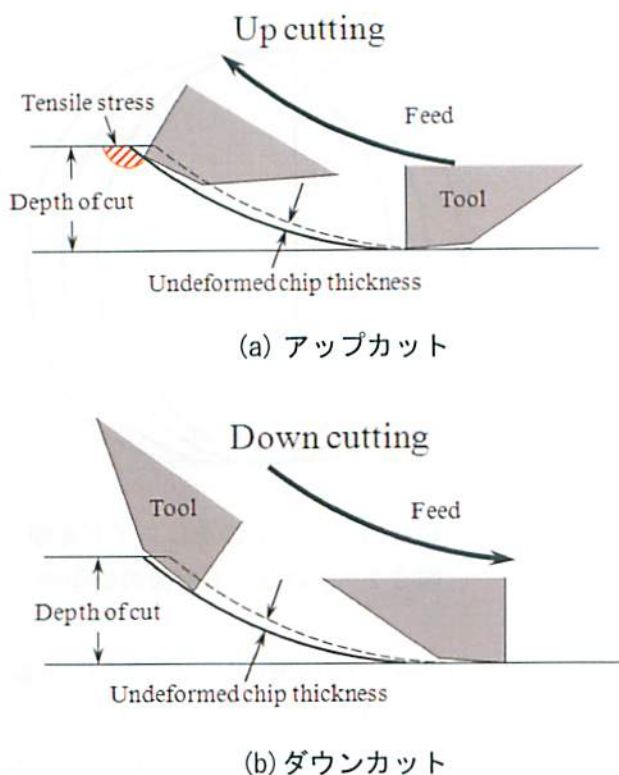
以上より，フライカットはガラスの延性モード加工の手法として有望であると考える．

(a) アップカットのトロコイド曲線

(b) ダウンカットのトロコイド曲線

図 3.2　トロコイド曲線の描画例

通常の旋盤加工(旋削)では，工作物に回転運動を与え，工具は直進運動を行って切削加工を行う．フライカットはフライス加工と同様に工具へ回転運動を与え，工作物には直進運動を与えて断続切削を行う．工具の回転方向と工作物の送り方向によってアップカットとダウンカットが存在する．アップカットとダウンカットでは，工作物に加わる力の方向と工具と工作物の接触時における切取り厚さが異なる．

フライカットでは一刃あたりの切取り厚さと工具全体の切込み量が大きく異なるため，ガラスの延性モード切削が可能な切取り厚さを大きく超えた切込み量でも延性モードによる加工が可能となる(図 3.3 参照)．昨年度までの研究成果では，ソーダ石灰ガラスへ深さ約 15μm のクラックのない溝を 1 ストロークで加工している．通常の旋削では切込み深さが 0.1μm 程度なので，150 倍もの切込み深さで延性モード切削を実現した．また，旋削加工では工具と工作物は常に接触しているが，フライカットでは断続切削のために接触・非接触を繰り返す．そのため，刃先温度は非接触時に冷却されて低下し，熱的損傷が軽微となって工具寿命が延長される利点も備える．

(a) アップカット

(b) ダウンカット

図 3.3　アップカット(a)とダウンカット(b)

以上のように，フライカットはガラスの延性モード切削において加工能率，工具寿命ともに旋削を上回り，ガラス切削に適した特徴を有している加工方法である．

3.3　超精密旋盤

本研究で用いる超精密旋盤は，レンズ金型の切削加工を目的として国内光学機器メーカと共同開発した装置をベースとしている．この装置開発の段階で，プロトタイプとして動作・機能確認に使用したスライドレール，スピンドルなどの構成部品と新規に製作した制御盤を組み合わせ，新たな超精密旋盤(図 3.4 参照)とした．この超精密旋盤を用いてガラス切削の研究を行っている．

ガラスを金属同様な延性モードで加工を行うには，工具切込み量が延性･脆性遷移点を安定して下回る必要がある．そのためには，加工機械の位置決め分解能，回転軸振れ，運動精度が延性・脆性遷移点以下でなければならない．また，加工力による変形量が送り分解能未満となる工作物・工具支持剛性が必要となる[10]．以上の性能を有し，ガラスの延性モード切削を行うためには以下に列挙する能力[19]が超精密旋盤に要求される．

(1) 必要な静剛性値は 100N/μm 以上[20]．

(2) 加工時の振動を抑制可能な案内．

(3) 0.1μm 以下の切込み量を安定して実現する位置決め機構．

(4) 0.1μm 以下の切込み量を加工範囲で維持可能な運動精度．

(5) 熱変形により切込み深さが変動しない温度安定性．

これらの能力を実現するため，以下に列挙する機械要素・技術を用いた．

- 1nm 分解能のデジタルスケール
- アッベエラー最少のスケール配置
- メトロロジ・フレームによるスケール支持
- 最小設定単位 1nm のパソコン NC(PMAC)
- X-Z 直交二軸構造(熱対称)
- 油静圧スライド
- X 軸側面に刃物台を設置
- 主軸中心と X 軸中心が一致する構造
- グラナイト定盤のベッド
- 低粘度の作動油を低圧力・低流量で供給
- 大容量作動油タンク，放熱器の設置
- 小型化設計
- 空気静圧スピンドル
- ボールねじの静圧パッドによる推力伝達

この超精密旋盤を使用し，フライカットによる切削実験を行うための改造を行った．主軸スピンドルの真空チャックを外し，回転工具を取り付けた．X 軸スライドの工具ホルダを外し，工作物把持用の真空チャックを取り付けた．

図 3.4　超精密旋盤

3.4　切削力測定用真空チャック

切削現象の解明には，切削力の測定は必須であ

る．また，切削力の出力波形によって，加工モード（延性モード，または脆性モード）の判別が可能である．そのため，KISTLER 社製，三成分力センサ(型式 9601A3)を組み込んだ切削力測定用の真空チャックを使用した．外観を**図 3.5** に示す．この三成分力センサによって測定された切削力(出力)は，KISTLER 社製のアンプ(Type5073)で増幅し，同社製データ収集システム(DATAFLOW Light Ⅱ)および，データロガー(グラフテック製，GL900-4)を経由して PC に取り込んだ．

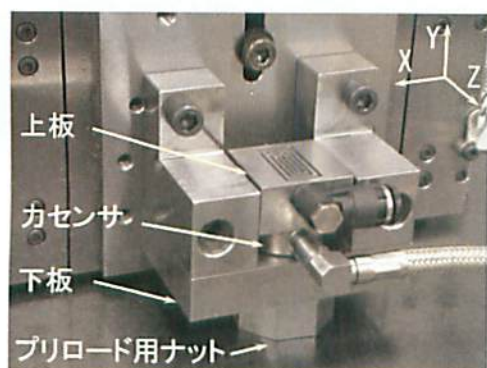



図 3.5　切削力測定用真空チャック

3.5　被削材

本研究の対象となる被削材はガラスである．ガラスはレンズなどの光学部品から DNA チップに代表される理学・医学機器においても多用されており，さまざまな種類が存在する．そのため，被削材となるガラスの種類は，最も一般的なソーダ石灰ガラスとした．顕微鏡用のスライドガラス（松浪硝子工業製，76×26×1.5mm）を真空チャックの大きさに合わせてカットして使用した．また，切削温度の測定には**図 3.6** に示す石英ガラスの光ファイバ(三菱電線 ST400E-FV，ST800G-FV)を使用した．この光ファイバの片側には接続用のコネクタ(FC コネクタ)を取付け，ファイバ型放射温度計に接続できるようにした．これにより，光ファイバの加工(研削・切削)で発生した赤外線を放射温度計で検知することが可能となる．

図 3.6　切削温度計測に用いた光ファイバ

3.6　切削工具

切削温度計測の加工実験には，K10 相当の超硬合金工具(三菱マテリアル製 HTi10：DCMW11T304)を使用した．cBN の研摩実験には，住友電工ハードメタル製 cBN 工具（BN700 ：NU-DCGW11T304）を使用した．バインダレス cBN(マイクロ・ダイヤモンド製)は角断面溝の切削実験に使用した．工具の先端形状は矩形であり，すくい角 0°，逃げ角 7°，工具先端幅 1mm である．

3.7　データロガー

KISTLER 社三成分力センサ，ファイバ式赤外線温度センサからの出力データを記録するため，4ch マルチファンクションデータロガー(グラフテック製，GL900-4)を使用した．本装置は 4ch の入力があり，X，Y，Z 方向の切削力と切削温度の入力を同時に記録することが可能となる．記録したデータはUSBメモリなどによってPCへ転送可能であり，データ処理が容易に行える．外観を**図 3.7** に示す．

図 3.7　データロガー

3.8 ファイバ式放射温度計

加工現象の解析・把握には，切削時の温度は必須の情報となる．非接触で温度を測定できる温度センサとしてファイバ式放射温度計(ジャパンセンサー製，FTZ6－R300-5B12)を使用する．昨年度の研究において，放射温度計に切削用の石英ファイバを取り付け，その石英ファイバを直接切削して切削温度の測定を試みた．しかしながら，光ファイバの直径が細く，切削温度の測定ができなかった．今年度は光ファイバの直径を変更し，切削温度の測定を試みる．放射温度計の外観を図 3.8 に示し，仕様を表 3.1 に示す．

図 3.8　光ファイバ式放射温度計

表 3.1　ファイバ式赤外線温度センサの仕様

項　目	基　準　値
測定範囲	300～2,000℃
実効波長	1.95～2.5μm
検出素子	InGaAs(電子冷却)
レンズ径	Φ15
ファイバ計	Φ0.1
測定距離	50㎜
標的サイズ	Φ0.3
アナログ出力	0～1V(300～2,000℃)

3.9 スカイフ盤

本研究では，ダイヤモンド加工用装置として歴史が古く，バインダレス cBN の加工にも応用可能を考えられるスカイフ盤(イマハシ製作所，DTP-300A)を用いた．スカイフ盤の外観を図 3.9 に示す．本スカイフ盤のスピンドルは空気軸受けを採用しており，一般のスカイフ盤と比較して回転精度が高い特徴を持つ．スピンドル駆動のモータはインバータ制御され，スカイフの回転数は 1,000～3,200min^{-1}(最高研摩速度：約 3,000m/min)の範囲で任意に設定可能である．

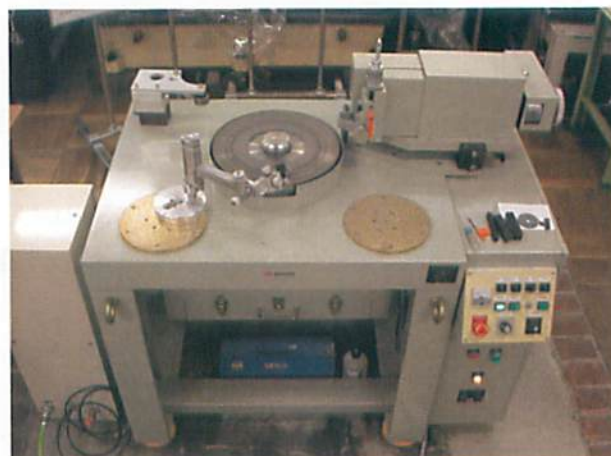



図 3.9　スカイフ盤

3.10 エアタービンスピンドル

光ファイバの研削および切削には卓上フライス盤を使用する．卓上フライス盤付属の主軸では回転数が低く(加工速度が低い)，回転精度も期待できない．加工速度を向上させる目的で，図 3.10 に示すナカニシ製エアタービンスピンドル(ABS-1200)を卓上フライス盤に取付ける．本エアタービンスピンドルの主な仕様は，最高回転数 120,000min^{-1}，最大出力 192W，軸受吸気圧力 0.6～0.65MPa(60Nl/min)，タービン吸気圧力 0.24～0.55MPa(265Nl/min)，動的振れ精度 0.002mm 以下，静的振れ精度 0.003mm 以下である．スピンドル回転数は，供給空気圧の調整で設定する．

図 3.10　エアタービンスピンドル

4．加工実験

本工実験では，ガラス加工に用いるバインダレス cBN 工具の成型を目標とし，ガラスの延性モード切削に関する研究を進める．そのため，基礎的な加工現象の把握として今年度は切削温度の測定，スカイフなどを用いて cBN の研磨，および角断面溝の切削実験を行った．

4.1 切削温度

切削温度は加工面品位と工具寿命を左右する重要な因子である．加工現象の調査において，切削温度の把握・測定は必須である．切削に消費されるエネルギーは 99%以上が熱となって切りくずや工作物，工具に流入する．

切削熱の発生源は，下記に示す３つの領域が考えられる．

1) せん断面(せん断領域：厳密には厚さがある)でのせん断変形エネルギー
2) 工具すくい面と切りくずとの摩擦
3) 工具逃げ面と仕上げ面との摩擦(切取り厚さが微小になると比率が高まる)

切削熱によって工具，工作物は温度上昇し，熱膨張が発生する．この熱膨張によって個々の部位は変形(熱変形)し，加工精度低下の大きな原因となる．また，工具に流入した熱は刃先のへたり(熱による塑性変形)や逃げ面・すくい面に生じる工具摩耗を促進させる[21]．

ガラスのフライカットにおいて，切削温度の測定を試みていたが成功していなかった．**図 4.1** にソーダ石灰ガラス(顕微鏡用スライドガラス)を乾式加工した例を示す．加工条件は主軸回転数：2,000min^{-1}(切削速度：238m/min)，送り：X 方向 4mm/min，Z 方向 0.63mm/min である．この観察画像の加工では，図中に示した矢印の向きに工具を送り，KSK の文字をスライドガラス表面に刻んだ．図中の縦方向は工具を Z 軸方向に送って加工した部分である．そのため，工具の送りは通常のフライカットとは直交する方向であり，ドリル加工時における工具回転および軸送りと同様の方向である．図中の斜め方向は，X 軸と Z 軸を同時に送っている．**図 4.2** に文字部分の拡大像を示す．**図 4.3** は**図 4.2** の丸で囲んだ部分をレーザ顕微鏡で詳細に観察した像である．この図の左側は工具が工作物から離脱する部分であり，右側は工具が工作物へ食い込む部分である．**図 4.4** は**図 4.3** の点線部分の輪郭形状をレーザ顕微鏡で測定した結果を示す．この図から，工具が離脱する部分では輪郭形状に盛り上がりが確認されるが，食い込む部分では確認されない．**図 4.5** は，工具が工作物から離脱する箇所(盛り上がり部分)を拡大したものである．この図より，ガラスに塑性流動が発生し，盛り上がった様子が確認できる．塑性流動はガラスが切削時に発生した熱によって軟化しなければ発生しない．ソーダ石灰ガラスの軟化点は 600～700℃である．**図 4.1** の加工において，塑性流動がガラスの軟化によるものであるならば，切削温度は 600℃を超えているはずである．

フライカットによってソーダ石灰ガラス(顕微鏡用スライドガラス)の被削材に溝加工を行った例を示す．加工条件は主軸回転数：2,000min^{-1}(切削速度：238m/min)，送り：X 方向 5mm/min，乾式加工である．**図 4.6** は加工溝のレーザ顕微鏡像である．幅が約 140μm の溝であるが，この溝の部分は肉眼では白く見える．この画像で黒く映っている部分は加工面に付着したガラスの切りくずであり，クラックではない．切削熱によって軟化した切りくずが，加工面に再付着したものである．この加工においても，切削温度はガラス軟化点の 600℃を超えていると考えられる．

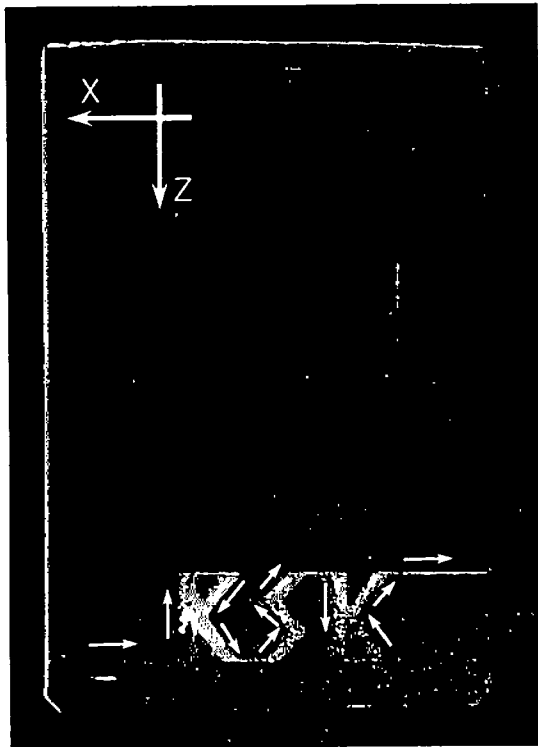



図 4.1　ソーダ石灰ガラスの乾式加工例

図 4.2　文字部分の拡大

図 4.3　ソーダ石灰ガラス(乾式加工)
レーザ顕微鏡像

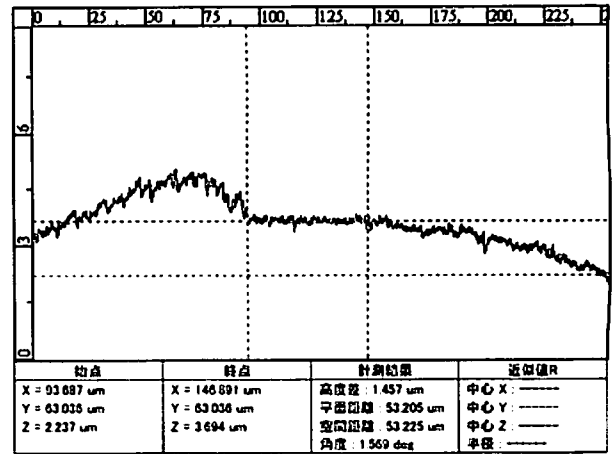



図 4.4　レーザ顕微鏡による輪郭形状

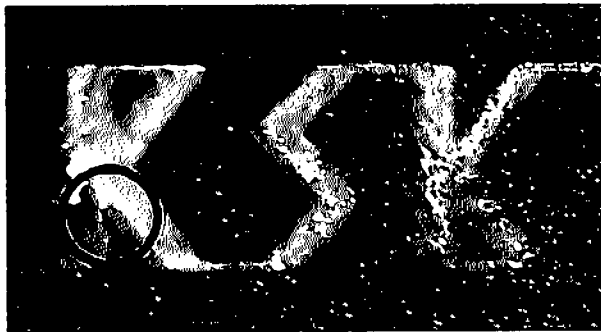



図 4.5　工具離脱箇所(盛り上がり部分)の
ガラス表面観察像

図 4.6　加工溝に付着した切りくず

4.1.1　切削温度測定方法　切削温度の測定には，さまざまな手法がある．その中で，被削材に手を加えず非接触で温度の測定が可能な方法として，赤外線を用いた測定方法がある．ガラスは赤外線を透過するので，赤外線温度計を切削温度の測定に用いることにした．フライカットは工具が

回転するため，刃先の温度を測定することは困難である．しかし，赤外線を透過するガラスの特性を生かし，切削温度の測定を被削材の裏面から測定する方法を考案した(図 4.7 参照)．切削温度の測定実験では，ファイバ型放射温度計(ジャパンセンサ製，FTZ-6)を使用した．使用するファイバ式赤外線放射温度計の測定スポット直径は 0.3mm であり，応答時間は 1msec である．このフライカット工具の法線方向から温度を測定する方法では，工具が測定スポットを通過する時間が短い．そのため，赤外線温度計が応答できず，切削温度の測定ができなかった(平成 19 年度)．次に，石英ガラスの光ファイバをフライカットによって切削し，光ファイバ内を伝達する赤外線によって切削温度を測定する方法を考案した(平成 20 年度)．図 4.8 に光ファイバ切削の模式図を示す．光通信などに用いられる光ファイバは，外径 125μm で光が伝送するコア径が 50μm である．この外径 125μm の光ファイバを実験に用いた．しかしながら，光ファイバの直径が細く光が伝送するコア部分を工具が通過する時間が短いため，切削温度の測定はできなかった．

今年度は，光ファイバの切削による切削温度測定を実現するため，コア部分を工具が通過する時間を長くなる対策をとる．そのため，光ファイバの直径を拡大することにした．光ファイバの外径を 125μm から拡大し，外形 600μm(コア径 400μm)の光ファイバを手配し，実験を行うことにした．

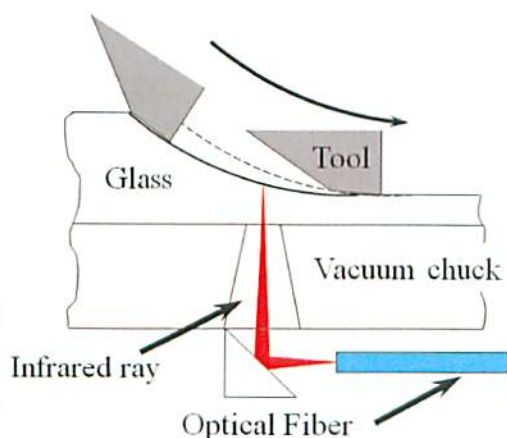



図 4.7　法線方向からの切削温度測定

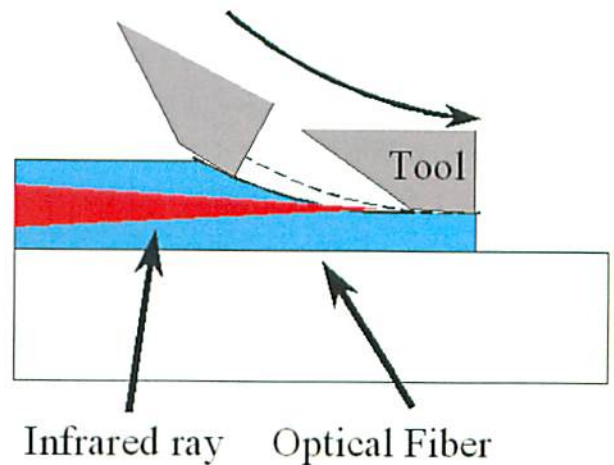



図 4.8　石英ファイバ切削による切削温度測定

4.1.2　ファイバ型放射温度計の校正　切削温度を測定するファイバ型放射温度計は，赤外線を発生する物体の放射率を設定する必要がある．放射率は物体固有の値であり，黒体は 1 であるが一般の物体は 1 以下となる．ガラスの放射率は放射温度計の取扱説明書には 0.94 と記述されているが，放射温度計付属の光学部品(光ファイバ，集光レンズ)を使用した場合に限られる．本実験では，放射温度計付属の光ファイバではなく，加工用に購入した光ファイバを放射温度計に接続する．そのため，光ファイバを加工した際に発生する切削温度や研削温度などの加工温度を再現し，放射温度計のセンサが感知するか確認する必要がある．そのため，熱源を用いて加工用光ファイバを加熱する．加熱された光ファイバが放射する赤外線を放射温度計で測定し，同時に加熱個所を熱電対温度計で測定する．両温度計の測定値を比較し，その温度差を校正すれば正確な光ファイバの加工温度を得ることができる．そのため，半田ごてヒータ(HAKKO 製，No.790-H)と校正証明書付き熱電対温度計(HOZAN 製，DT-510)を使用し，放射温度計の校正を行った．半田ごてのヒータに加える電圧は変圧器(可変単巻変圧器)を用いて変化させ，任意の温度が得られるようにした．また，円筒タイプの半田ごてヒータを使用し，内部には熱伝導率の高い銅の丸棒にすり割り加工を施した治具を挿入した．この加熱治具のすり割り部分に光ファイバと熱電対を挟み，加熱した．実験装置外観を図

4.9に示す．図4.10は光ファイバの加熱治具先端の拡大写真である．加熱治具のすり割り部分には光ファイバと熱電対が挟み込まれている．

図 4.11 に熱電対とファイバ式放射温度計の測定結果を示す．この図の横軸には放射温度計の測定結果を示し，縦軸には熱電対の測定結果を示してある．熱電対温度計の測定結果は 400℃から700℃弱までであるが，双方の測定結果は直線にプロットされている．加工温度が 700℃を超過した場合においても，外挿すれば問題ないと判断した．以上より，放射温度計によって光ファイバの温度が測定可能であることを確認した．図中には放射温度計出力を実際の温度に換算する計算式

Y＝1.253X＋26.666

が表示されている．この計算式の X に放射温度計の指示温度を代入すれば，Y となる熱電対の温度(光ファイバの温度)を得ることができる．

図 4.9　放射温度計の校正方法

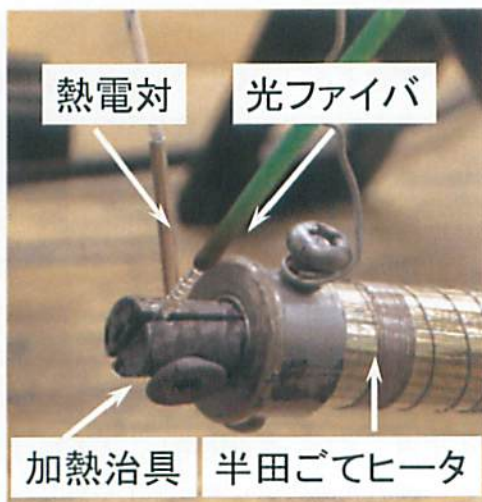



図 4.10　加熱治具先端

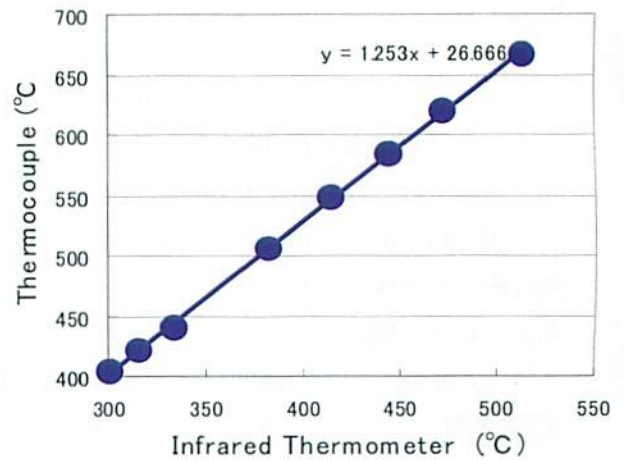



図 4.11　放射温度計と熱電対の測定結果

4.1.3　研削温度の測定　光ファイバを機械加工することによって，工温度が検出可能であるか，確認するための実験を行うことにした．光ファイバの加工によってファイバ型放射温度計が赤外線を検出するためには，以下の 2 つの方法がある．

(1)赤外線源となる工具刃先がコアを通過する時間を長く(1msec 以上)する．

(2)一つ以上の赤外線源(工具刃先)をコア部分へ常に存在させる．

(1)の手法では加工速度を低下させなければならず，加工温度も低下するために赤外線温度計で加工温度が検知できなくなる可能性がある．(2)の手法ならば，確実かつ連続的に赤外線を放射温度計へ到達させることが可能となる．(2)の手法を実現するためには，高速で回転し，多数の切刃を持つ工具による加工が必要となる．そのためには，砥石を高速回転させて光ファイバを研削すれば実現可能となる．以上より，確認実験を卓上フライス盤に高速スピンドルを取付けて行うことにした．実験に使用する卓上フライス盤(オリジナルマインド製，PRX-1510)の駆動モータはステッピングモータであるが，低速送りを行うためにドライバを自作した．スピンドルにはタービン方式のエアタービンスピンドル(ナカニシ製，ABS-1200)を用いた．砥石は軸付きの電着ダイヤモンド砥石(直径 4mm，#150)を使用した．

光ファイバは光が通過するコアとクラッドで構成されている．光ファイバの模式図を図 4.12 に示す．また，図 4.13 の模式図に示すような砥粒間隔

であれば，光ファイバのコア部分に熱源が複数存在することになり，(2)の条件が成立する．

(2)を実現するためには，赤外線源となる砥粒が直径 400μm の光ファイバコアの部分に存在するか確認する必要がある．そのために，砥粒の間隔を測定した．実験に使用する電着ダイヤモンド砥石(直径 4mm，＃150)の外観を図 4.14 に示す．砥粒間隔はこの砥石表面を顕微鏡撮影し，研削加工に寄与している砥粒(先端が摩耗している)の間隔を測定した．砥石表面の光学顕微鏡像を図 4.15 に示す．この図では，縦方向が加工方向であり，画像の範囲は 500μm である．この図の任意に選んだ3ヵ所では，加工に作用している砥粒数は3個，2個，4個である．同様に砥石表面の別の個所を撮影し，合計 7 ヵ所で平均砥粒数を求めた結果，砥石表面の500μmに存在する平均砥粒数は3個である．砥石の連続切れ刃間隔の平均値は 500/3＝167μm となる．赤外線源である切れ刃の間隔がコア径の 400μm 以下となるので，前述の(2)の条件は実現できる．実際には，光ファイバのコアへ研削砥石は円弧で接するため，接触長さはコアの直径より長い．また，光ファイバコアと砥石の接触面は円弧を描いた楕円となる．砥粒は砥石の軸方向にも存在するので，この楕円の接触面には多数の砥粒が接していると考える．

研削実験の装置外観を図 4.16 に示す．図中の番号は以下の実験に使用した装置と機器を示す．

①エアタービンスピンドル(ナカニシ製，ABS-1200)
②卓上フライス盤(オリジナルマインド製，PRX-1510)
③光ファイバ(三菱電線工業製，ST600F)
④ファイバ型放射温度計(ジャパンセンサ製，FTZ-6)
⑤ステッピングモータ(オリジナルマインド製，TYPE510742)
⑥モータドライバ(自作)
⑦ファンクションジェネレータ(エヌエフ回路設計ブロック製，E-1011A)
⑧データロガー(グラフテック製，GL900)

光ファイバは外形が 600μm であるため，研削するための固定は困難である．昨年度に行った実験では，外形 125μm の石英ファイバとスライドガラスの接着に化学反応形接着剤(瞬間接着剤，エポキシ系接着剤)を使用した．接着剤は，光ファイバの固定では問題なかったが，作業性に問題があった．そのため，今年度の実験では紫外線硬化樹脂を接着剤として用いることにした．使用した紫外線硬化樹脂はエドモンド・オプティクス・ジャパン製の NOA81 で，一般に光学レンズなどの接着に用いられる．硬化前の粘度は瞬間接着剤とエポキシ系接着剤の中間程度である．卓上旋盤のベッド上にアクリル樹脂製の固定治具を設置し，アクリル樹脂の端面に溝を加工して光ファイバのガイドとした．光ファイバは固定治具のガイド溝に沿うように接着テープで仮止めし，固定治具端面に紫外線硬化樹脂を塗布した．受信塗布後に，紫外線を放射して樹脂を硬化させる．当初，樹脂硬化のための紫外線光源として紫外線 LED を用いたが，出力が低く硬化しなかった．次に，紫外線の光源を殺菌ランプに変更した．殺菌ランプは食品・医薬品の紫外線殺菌に用いられる蛍光灯同様の照明器具である．波長 253.7nm(水銀の共鳴線)の紫外線を放射するので，樹脂の硬化に使用した．図 4.17 に直管型殺菌ランプで紫外線硬化樹脂を硬化させ，光ファイバの固定を行っている状態を示す．15 分程度の紫外線照射で樹脂は硬化した．硬化後は研削を行っても光ファイバが脱落することなく，強固な接着が行えた．

研削温度はファイバ型放射温度のアナログ出力をデータロガーに取込み，そのデータを図 4.11 の係数で校正した．研削条件は，スピンドル回転数約 95,000min^{-1}(研削速度：1,193m/min)，送り速度送り 12mm/min で，乾式である．切込み量は，光ファイバのコア部分をすべて加工できる 500μm とした．エアタービンスピンドルは，供給する空気圧で回転数の調整が可能である．本実験の供給空気圧は 0.3MPa である．図 4.18 に得られた研削温度の一例を示す．最高温度は約 1,250℃を示し，800℃を中心に 1,000℃～600℃の範囲で推移している．研削温度の変動は，ステッピングモータのコギングトルクによる送り速度の変化が原因であると考える．

以上より，ファイバ型放射温度計に接続した石

英ガラスの光ファイバを研削加工し，研削温度が測定可能であることを確認した．本実験より，赤外線利用によるガラスの加工温度を測定する新たな手法を確立した．

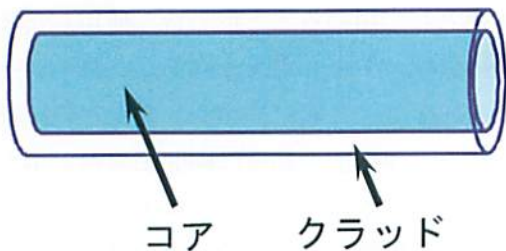



図 4. 12　光ファイバ構造の模式図

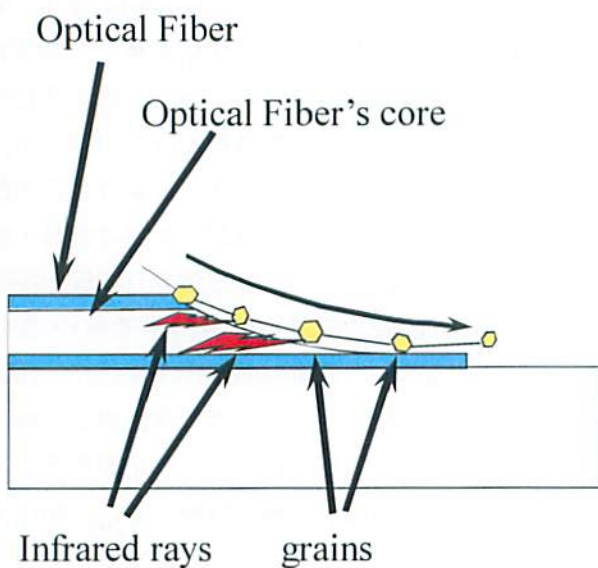



図 4. 13　光ファイバの研削

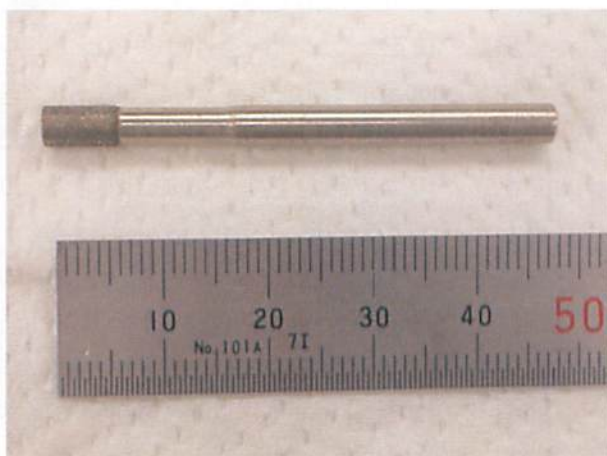



図 4. 14　電着ダイヤモンド砥石外観

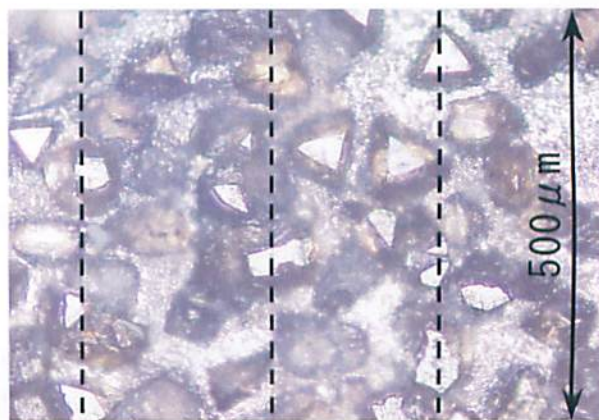



図 4. 15　電着ダイヤモンド砥石表面の砥粒間隔

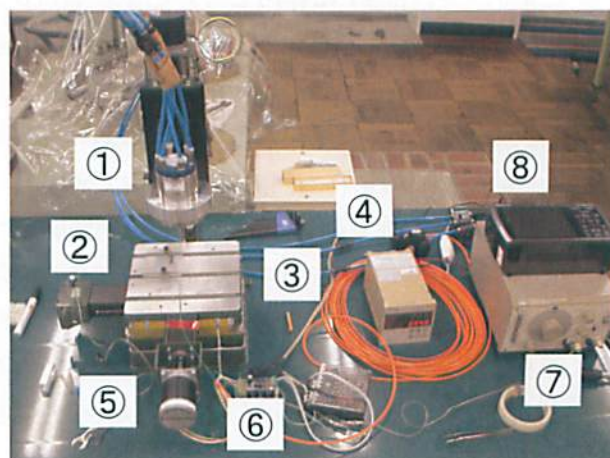



図 4. 16　実験装置外観

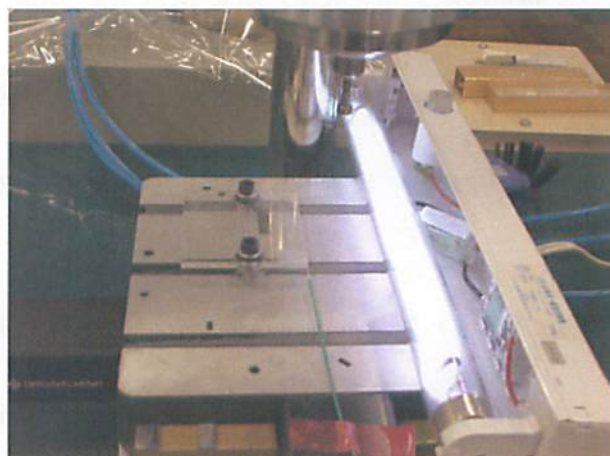



図 4. 17　紫外線硬化樹脂による光ファイバと治具の接着

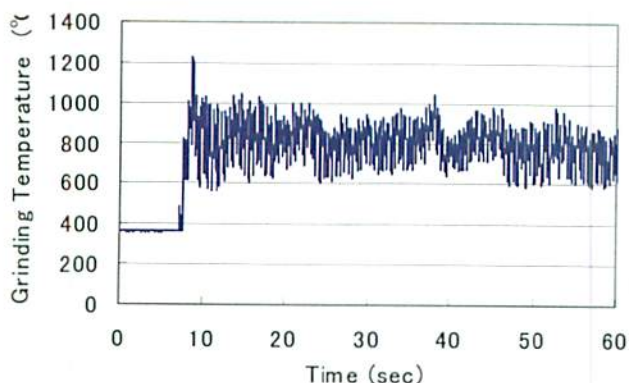
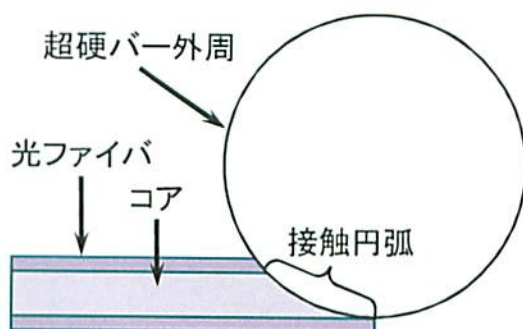



図 4.18　光ファイバ(石英ガラス)の研削温度

図 4.19　超硬バー外観

図 4.20　超硬バーと光ファイバの接触円弧

4.1.4 切削温度測定実験(超硬バー切削)　前項では軸付き砥石による研削温度の測定には成功した．本項では，切削温度の測定が可能となるか確認する．切削加工は研削実験と同一の装置・機器を使用する．切削実験には超硬バーと呼ばれるバリ取りなどに使用される工具を用いる．**図 4.19** に超硬バー(直径 6mm，刃数 17) の外観を示す．この超硬バーの切れ刃間隔は，直径 6mm に 17 枚の刃があるため，工具の円周(6×π＝18.85mm)÷17＝1.1mm となる．**図 4.20** に超硬バーと光ファイバの接触状態(切込み)の模式図を示す．光ファイバのコア部分(直径 400μm)と超硬バーの接触円弧の長さを計算すると，約 1.57mm となる．硬バーと光ファイバコアの接触円弧の長さは超硬バーの刃先間隔より長い．計算上，光ファイバのコアには超硬バーの刃先が常に 1 箇所以上接していることになり，前項の放射温度計で加工温度が測定可能となる条件の(2)を満足する．

以上より，超硬バーを用いてコア径 400μm の光ファイバの切削実験を行うことにした．加工条件はエアタービンスピンドル回転数 95,000min^{-1}(切削速度 1,790m/min)，送り 6mm/min，乾式切削である．切込みは，光ファイバのコアをすべて加工する 500μm である．**図 4.21** に超硬バーで光ファイバを切削した切削温度の測定例を示す．この図より，切削温度は最高約 1,250℃であることがわかる．この測定値は，4.2.2 項に記述した放射温度計指示温度の補正計算式で構成した値である．以上より，前項の研削温度測定と同様に超硬バーによる切削温度の測定にも成功した．

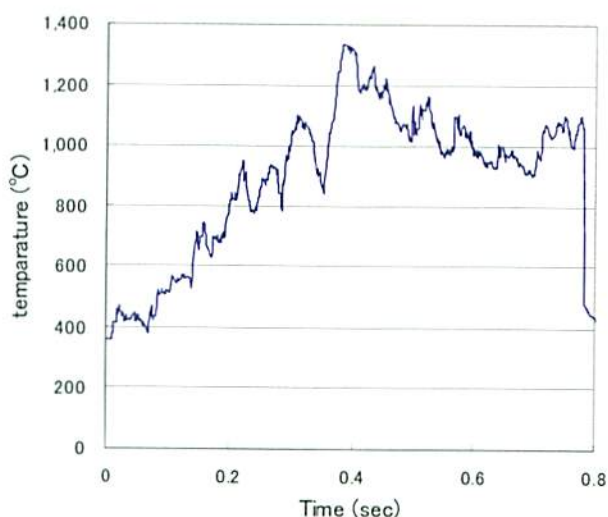



図 4.21　超硬バーによる光ファイバの切削温度

4.1.5 切削温度測定実験(フライカット)　前項において，超硬バーによる切削温度の測定に成功した．本項では，超精密旋盤を用いたフライカットによる光ファイバ切削の切削温度測定に取り組む．超精密旋盤は前項で使用したエアタービン

とは異なり，最高回転数は2,000min^{-1}，切削速度は238m/min程度となる．切削速度は超硬バー(エアタービン)と比較すると大幅に低下する．また，フライカットでは単一の工具を使用する．単一工具で切削温度の測定を行う場合では，光ファイバのクラッドに刃先が接する時間を長くすると，放射温度計で切削温度を感知する確率が高まる．図4.22に光ファイバコア径，主軸回転数と切削時間の関係を計算した結果を示す．切削時間とは，図4.20に示す接触円弧を工具が通過する時間である．同図の計算結果より，光ファイバのコア径が800μmならば，切削時間は2msec以上となり，確実な放射温度計による切削温度の検出が期待できる．以上より，本実験ではコア径800μmの光ファイバを使用した．

加工実験に使用する工具はK10相当の超硬合金(タンガロイ製TH10)である．光ファイバは紫外線硬化樹脂で顕微鏡用スライドガラスに固定し，乾式切削を行った．

実験手順を以下に記す．

(1) 真空チャックに吸着させた顕微鏡用スライドガラス(ソーダ石灰ガラス)に溝加工を行う．加工条件は主軸回転数2,000min^{-1}，送り速度4mm/min，切込み量10μm，極圧潤滑被膜剤塗布である．この溝は光ファイバの位置決めに使用するガイドとなる．さらに，工具の切込み量がゼロの位置となるため，切込み量の設定に重要な意味を持つ．
(2) 溝加工を行ったスライドガラスを真空チャックに吸着させたまま洗浄(局圧潤滑被膜剤の除去・脱脂)する．
(3) 光ファイバの被覆樹脂，アラミド繊維などの保護層を除去し，石英ガラスの芯線を100mm程度露出させる．
(4) 真空チャック上のスライドガラスに加工された溝に光ファイバの芯線を配置し，接着テープで仮固定する．
(5) 光ファイバとスライドガラスの溝へ紫外線硬化樹脂を滴下，塗布する．光ファイバ固定用の接着テープと溝の中にも紫外線硬化樹脂を浸透・充填させる．
(6) 真空着上部に紫外線源となる直管型殺菌ランプを配置し，紫外線を照射して樹脂の硬化・光ファイバを固定させる．
(7) 光ファイバ加工のために切込み量を設定する．顕微鏡用スライドガラスに溝加工を行った真空チャックのY方向位置を，光ファイバの切込み量(コア直径800μmにクラッドの厚さ100μmを加えた900μm)まで移動させる．
(8) 主軸回転数2,000min^{-1}，送り0.5mm/minの加工条件で，光ファイバのフライカットを行う．

なお，真空チャックには三成分力センサが内蔵されている．そのため，光ファイバのフライカット時には，切削力と切削温度は同時に測定が可能となる．これらのデータはデータロガーで収集し，同時にKISTLER社のデータ収集システムで切削力の監視を行った．

図4.23にフライカットによる光ファイバ切削の切削温度と切削力の測定結果の一例を示す．切削温度の最大値は865℃である．同図の赤線が切削温度を示し，緑線はX方向切削力，青線はY方向切削力，茶色線はZ方向切削力を示す．

切削温度と切削力の出力波形において，波形の立ち上がりに約1msecの差が生じている．実験に使用した放射温度計は入射した赤外光のエネルギー量を温度に換算するため，演算処理を行う．その演算に約1msec要するため,演算結果がその分,遅れて出力される．放射温度計の演算では，以下の処理を行う．

(1) 赤外線受光素子(InGaAs)は受光した赤外線のエネルギー量に応じて出力する．この受光素子のアナログ出力をA/D変換する．
(2) 受光素子の出力は温度に対して非線形に増加するため，デジタル回路にて非線形の受光素子出力を線形に修正する．
(3) 線形に修正された受光素子出力を表示および外部出力のためにD/A変換する．
(4) 線形に修正されたアナログの受光素子出力をアンプで増幅し，表示部および外部出力の端子へ導く．

この放射温度計では，温度検出は1msecの周期で行っている．そのため，検出した温度の出力は1msec周期の矩形波で出力される．温度検出の周期は1msecであるが，受光素子の応答時間は数十

μsec である．出力される温度は検出素子の応答時間である数十μsec の平均値であり，この温度が矩形波周期の 1msec 維持される．したがって，矩形波出力の変化(形状)と切削温度の変化は一致しない．この図では検出温度 865℃と 550℃の矩形波が出力されているが，検出周期に一致していた切削温度が上記の温度となる．

図 4. 23 の切削力の Z 方向は，原理的に力が発生しない方向である．この Z 方向切削力には 0.5N 程度の力が検出されているが，三成分力センサのクロストーク(内部干渉)によるものであると考える．Y 方向切削力と X 方向切削力に着目すると，切削力の検出初期では出力が逆方向に出力されていることがわかる．本実験ではダウンカットで切削実験を行っている．そのため，X 方向は工具の回転方向と工作物の送り方向が同一になり，工具が工作物を引き込む方向(マイナス方向)へ切削力が出力される．この Y 方向切削力の出力が逆転する現象は，光ファイバの切削だけでなくスライドガラスの切削時にも検出される．

切削力と切削温度の関係に着目すると，それぞれの出力時間が異なっている．検出時間を比較すると，切削力は約 300μsec であるが，切削温度は 1msec 以上 2msec 以下の範囲内(放射温度計出力の矩形波の出力時間は 2msec であるが，矩形波の幅と切削温度の曲線は一致しない)である．切削力の検出時間は切削温度よりも短く，図 4. 22 の切削時間と比較すると大幅に短い．この原因として，加工開始後の光ファイバに脆性破壊が生じ，光ファイバが破断して切削時間が短縮したと考えられる．しかし，切削温度の検出時間は図 4. 22 の計算結果と切削力程の差はない．光ファイバが破断した場合には，放射温度計への熱源が不明となる．光ファイバのフライカットと同時に接着剤として用いた紫外線硬化樹脂も切削している．この樹脂の切削時にも切削熱は発生するが，樹脂切削で発生した赤外線が光ファイバのコアに入射する可能性は低い．もし，紫外線硬化樹脂の切削で発生した赤外線が光ファイバに入射しているのであれば，切削温度の検出時間は大幅に増加する必要がある．

この切削力と切削温度の検出時間の相違については，今後の実験・研究で明確にする必要がある．

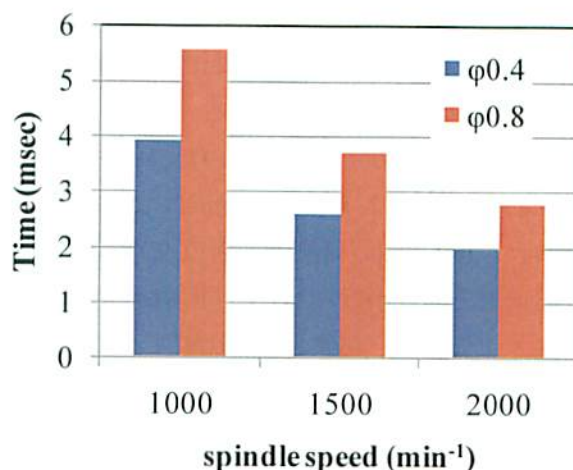



図 4. 22　光ファイバコア径，主軸回転数と切削時間の関係

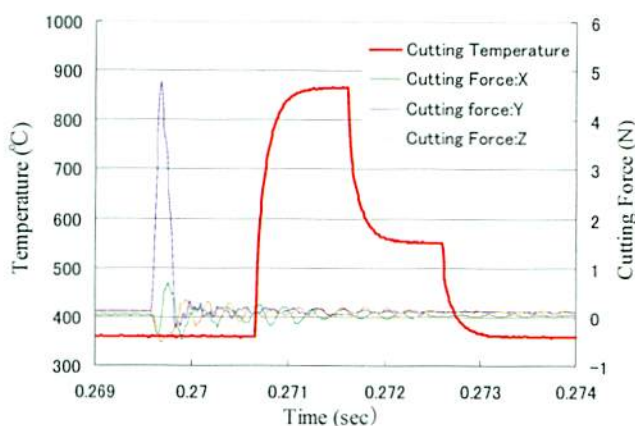
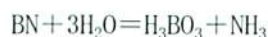



図 4. 23　フライカットによる光ファイバ切削温度，および切削力の測定結果

4. 2　工具研磨実験

バインダレス cBN 工具はマイクロ・ダイヤモンド社から購入しているが，購入の際に「水溶性切削液は使用不可である．cBN の N が水と反応してアンモニアに分解し，工具摩耗が進行する」と言われた．一般に，cBN 粒子は高温になっても安定で金属類との反応は起こらないといわれている．文献[22]によると，空気中では 1, 000℃付近から酸化が始まる．酸化が始まると表面に B_2O_3 の皮膜が生成し酸化の進行を抑制するが，1, 300℃付近になると，B_2O_3 の蒸発が起こり，重量減が始まる．800℃以下では水蒸気による酸化は起こらないが，900℃以上になると以下に示す分解反応が発生する．

$BN + 3H_2O = H_3BO_3 + NH_3$

また，レーザによるセラミックス加工に関する論文[23]では，レーザ照射による高温で水熱反応が

発生し，cBNの加工能率が向上するとされている．レーザ照射で発生する熱においても水(水蒸気)の存在はcBNの分解を促進する．

昨年度のスカイフ盤を用いたバインダレスcBNの研磨実験では，研磨面に光沢はなかった．表面粗さは，0.1μmRa(研磨方向と直交)および0.16μm(研磨方向と平行)であり，同時に研磨した単結晶ダイヤモンド，超硬合金と比較すると数～数十倍の粗さである．

本項では，バインダレスcBNの高能率な研磨を実現するため，水熱反応を利用した研磨方法について検討する．まず，住友電工ハードメタル製の一般的なバインダを含むcBN工具(BN700[24])で実験を行い，成果が得られたらバインダレスcBNの実験を開始するものとする．BN700はcBNの含有率が高いため，水熱反応がバインダレスcBN工具と同様になると考えられる．そのため，工具研磨実験にはBN700を選択した．

4.2.1 軸付き砥石による研磨　エアタービンを利用した光ファイバの研削では，1,000℃を超える温度が検出されている．同様の手法でcBNを水蒸気雰囲気中で研磨すれば，機械的な除去加工と同時に水熱反応が加わり，高能率なcBNの研磨が行えると考えた．

そこで，エアタービンスピンドルに軸付き砥石を取付け，研磨実験を行った．ダイヤモンド砥石を使用すると，ダイヤモンドより硬度の低いcBNは研磨されてしまう．そこで，cBNより硬度の低いアルミナ(Al_2O_3)砥石をエアタービンスピンドルに取付け，研磨実験を行った．水蒸気(水)がcBNの分解を促進するので，水蒸気発生源として，超音波式の加湿器を使用した．加湿器で発生する霧(水の微粒子)を直径6mmのエアホースで研削地点まで導いた．加湿器は霧を加圧して噴射しているわけではない．そのため，高速で回転(約95,000min^{-1})する軸付き砥石の周りに発生する気流の影響で，加湿器からの霧は飛散してしまい，研削点へ到達しなかった．次に，ルブリケータ(クロダニューマティクス製L508-02)を使用して，微量の水を噴霧する方式に改めた．エアホース先端にアルミニウムのパイプを取付け，研磨地点の近傍に水の噴霧(噴射)が可能となるように工夫した．エアタービンスピンドルで回転するアルミナ砥石にcBNを押し当てると，接触地点は赤く発光する．この発光部分はかなり高温になっていると考えられる．cBN工具を旋盤用ホルダ(シャンク)に取付け，ルブリケータによる水噴霧とともに回転するアルミナ砥石へ押し当てた．その結果，cBN工具表面には擦過痕は見られるが，研磨と表現できる程の除去量は得られない．

4.2.2 ラップ盤による研磨　当研究所には，材料分析などで試料の研磨を行うラップ盤(BUEHLER社，ECOMETGRINDER-POLISHER)ある．研磨紙にはさまざまな物があるが，cBNより硬度の低いSiC砥粒の研磨紙(#240)を用いてラップを行った．通常の試料研磨では，流水(水道水)を与えて研磨を行う．今回はcBNの研磨温度を上昇させる目的で，流水ではなく研磨紙を湿らせる程度の水分でラッピングを行った．その結果，cBN工具表面の目視で光沢が増加した程度であり，研磨と表現できるほどの除去量は得られない．

4.2.3 スカイフ盤による研磨　単結晶ダイヤモンドの研磨に使用されるスカイフ盤(イマハシ製作所製，DTP-300A)を用い，SiC砥粒によるcBNの研磨を試みることにした．スカイフ盤は前述のラップ盤より主軸回転数(最大回転数3,457min^{-1})が高く，主軸にはエアスピンドルを採用しているため回転精度も高い．

cBNの水熱反応を利用するためには，900℃を上回る温度が必要となる．スカイフ盤でどの程度の摩擦熱が発生するか，赤外線放射温度計と石英ガラスの光ファイバを用いて摩擦温度の測定を行った．石英ガラスファイバをスカイフ盤に押付け，その時の摩擦温度を赤外線放射温度計で測定した．スカイフ盤には，SiC砥粒(#1,000)とオリブ油を混合してペースト状にしたものを塗布した．

図4.24にスカイフ盤と光ファイバの摩擦温度測定の外観を示す．スカイフ盤のトング(工具を固定する治具)はバイトシャンクの取付け用の設計がなされているため，光ファイバの固定には鋼ブロックを利用した．主軸回転数2,378min^{-1}(摩擦速度1,120m/min)，乾式の摩擦条件で実験を行った．得られた摩擦温度では，最高1,567℃が検出された．**図4.25**は放射温度計の出力である．1,200℃

を中心に850℃から1550℃近辺で温度が周期的に変化している．この温度変化の周期は回転数と一致しており，スカイフ盤の回転振動と考える．この温度であれば，cBNに熱分解が発生する．次に，ブリケータによる水噴霧を行い，摩擦部分に水が存在する条件で摩擦温度の測定を行った．**図4.26**に放射温度計による摩擦温度の測定結果を示す．水を噴霧させた条件においても最高 1,446℃が検出されている．常に 800℃を超えた温度が検出されており，cBN が分解する温度を上回っている．以上の摩擦実験より，光ファイバとスカイフ盤の間ではcBNが熱分解する程の摩擦温度が得られることを確認した．

光ファイバとスカイフ盤の摩擦温度はcBNの水熱分解温度を超えるため，スカイフ盤による cBN 工具の研磨実験を行った．**図4.27**にスカイフ盤による cBN 工具研磨の外観を示す．**図4.28**は研磨部分の拡大写真である．ルブリケータからの水噴霧ノズルと cBN 工具の位置が確認できる．実験条件は光ファイバの摩擦温度測定と同一で，スカイフ盤回転数 2,378min^{-1}(摩擦速度 1,120m/min)，SiC砥粒(#1,000)塗布，水噴霧である．実験の結果，目視では cBN 表面の粗さは多少向上したように感じられる．しかし，研磨と表現できる程の除去量ではなく，ラップ盤と同程度の結果である．

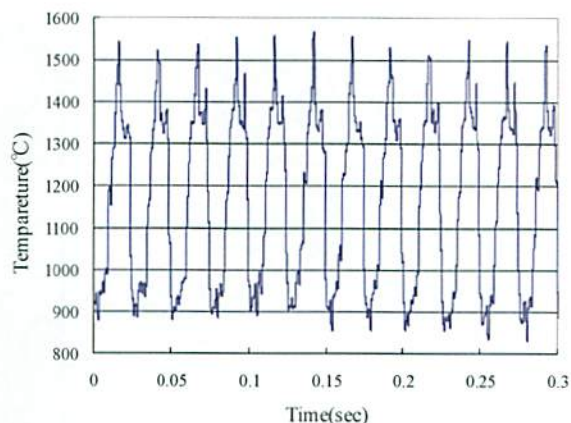



図4.25　スカイフ盤と光ファイバの乾式摩擦温度

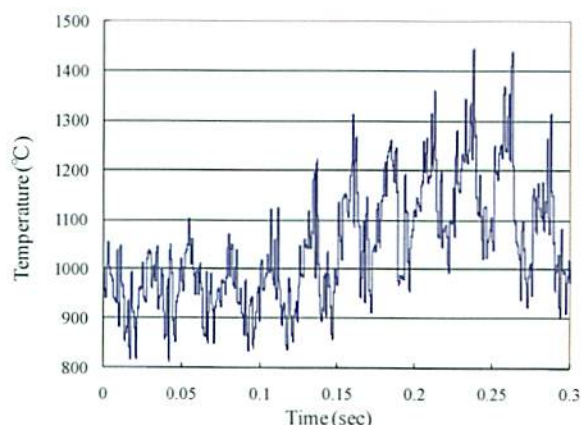



図4.26　スカイフ盤と光ファイバの湿式摩擦温度

図4.24　スカイフ盤と光ファイバの摩擦温度測定

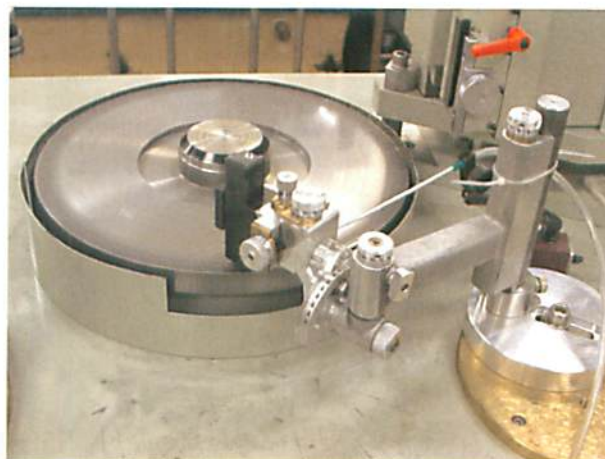



図4.27　スカイフ盤による cBN 工具の研磨

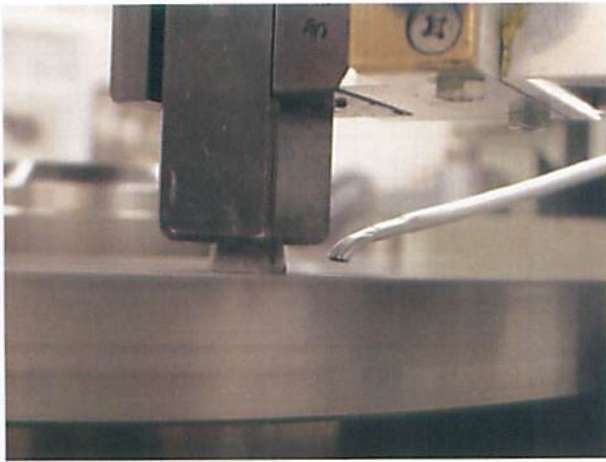



図 4.28　工具と水噴霧用ノズル

4.2.4　スカイフ盤と光ファイバおよび cBN の摩擦温度

スカイフ盤と cBN 工具の摩擦によって発生する熱と水分を利用した水熱反応による研磨実験を試みたが，成功しなかった．スカイフ盤と光ファイバでは摩擦温度が摩擦温度は 1,000℃を超えていた．cBN とスカイフ盤では摩擦温度がどの程度になるか，簡易計算による検証を行う．

摩擦熱は摩擦する 2 物体間の摩擦係数，押し付け荷重，摩擦速度によって変化する．固体が他の個体の表面をすべるとき，摩擦力はそれを妨げるように働き，その仕事の大部分は接触面で熱に変わる．丸棒の先端が平面板上を速度 Vcm/sec ですべると仮定する．その時の摩擦仕事がすべて熱に変わると，発生熱量 Q(cal/sec)は以下の式で表せる [25]．

$$Q = \frac{\mu WgV}{J} \qquad (1)$$

μ ：動摩擦係数
W：丸棒にかかる荷重
g ：重力加速度
J ：仕事の熱当量

上記(1)式より，光ファイバと cBN の違いは摩擦係数と荷重である．

また，速度 V，半径 a で摩擦(接触)している二つの物体(1, 2)が定常状態に達していると仮定する．その接触点温度を T，両物体温度を T_0 とすると，以下の式が成り立つ [25]．

$$T - T_0 = \frac{\mu WgV}{4aJ}\frac{1}{k_1 + k_2} \qquad (2)$$

k_1：物体 1 の熱伝導率
k_2：物体 2 の熱伝導率

上記(2)式より，物体 1 をスカイフ，物体 2 を光ファイバおよび cBN とすると，摩擦温度に影響を与える因子は以下となる．

(1) μ ：摩擦係数
(2) W：荷重
(3) a：接触面半径
(4) k_2：物体 2 の熱伝導率

上記(1)と(2)は計算式の分子であり，この値が大きいと摩擦温度は高くなる．また，(3)と(4)は分母であるため，この値が大きくなると摩擦熱は低くなる．

スカイフ盤との摩擦において，水熱反応を利用した cBN の研磨を実現するためには，光ファイバより cBN との摩擦の温度が高くなる必要がある．光ファイバより cBN の摩擦温度を上げるためには，分母の変数(摩擦係数，荷重)が大きく，分子の変数(接触半径，熱伝導率)が小さくなければ実現できない．

(1) スカイフ盤と光ファイバおよび cBN の摩擦係数は不明である．一般に摩擦係数は 0.1～1 の範囲内に収まるため，cBN の方が高いとしても数倍程度であると思われる．
(2) 荷重はスカイフのトング重量(1,375g)以下となる．鋼材のブロック等を追加しても，増加は 2 倍が限度である．
(3) 接触面積では，石英ガラスのファイバは直径 1000μm であるため半径は 0.5mm，cBN 工具は 2mm 程度である．したがって，4 倍程度の差となる．
(4) 熱伝導率 (W/mK) は大幅に異なる．石英ガラスは 1.38(19℃)～2.55(1,000℃) [26] に対し，cBN は 50(含有率 50-60%)～600(含有率～99%) [27] である．その差は 235 倍となる．

以上をまとめる．

・分子：数倍×2 倍≒最大 20 倍
・分母：4 倍×235 倍≒940 倍

光ファイバの摩擦実験と同条件で cBN を摩擦させると 20/940≒0.02 となり，摩擦温度は 1/50 になる．したがって，光ファイバでは 1,400℃～

1,500℃の摩擦温度がcBNでは28～30℃程度である．この温度ではcBNに水熱反応は発生しない．cBNの熱伝導率が高いため，摩擦熱によって熱分解反応を発生させることは困難であることが判明した．バインダレスcBNの研磨を高能率に行うためには，レーザなどの熱源を加えながら機械的な研磨を行うなどの手法が必要である．

4.3 角断面溝のフライカット ガラスの延性モード切削では，フライカット以外にエンドミルを工具とする切削方法の研究が行われている[17]．エンドミルによるガラスの切削では，DNAチップやマイクロリアクタを主眼に置いたマイクロ溝加工が対象である[18]．溝加工において，エンドミル加工では溝形状は工具の軸対象となるが，フライカットでは工具形状が転写された形状である．このフライカットの特徴を生かした溝加工を試みる．昨年度までの実験では，工具に旋削用スローアウェイチップを使用していた．そのため，工具先端にはノーズR(円弧形状)がつけられており，加工された溝の断面形状は円弧であった．

フライカットによる円弧形状以外の断面溝を加工するためには，工具先端を目的の形状に成形すれば実現できる．さまざまな形状が考えられるが，円弧以外の基本的な形状として角断面溝の加工を試みることにした．角断面溝の加工には，先端が矩形の工具が必要となる．マイクロ・ダイヤモンド社に依頼し，先端が矩形のバインダレスcBN工具を製作した．工具外観を**図4.29**に示し，先端の形状を**図4.30**に示す．この工具では幅1.0mmの溝加工が可能である．三菱マテリアル製超硬合金工具(HTi10, DCMW070204)を台座として使用し，先端部分にバインダレスcBNをロウ付けしてある．この先端にロウ付けしたバンダレスcBNに成形・研磨仕上げを施し，フライカット用の工具とした．

ソーダ石灰ガラス(顕微鏡用スライドガラス)を被削材として，主軸回転数2,000min^{-1}(切削速度250m/min)，送り2mm/min，極圧潤滑被膜剤塗布の加工条件で角断面溝加工用工具による加工実験を行った．**図4.31**に幅26mm長さ34mmの顕微鏡用スライドガラスへ角断面溝加工を行った加工例を示す．同図の加工例では，フライカットにおいてチッピングの少ないダウンカットによる加工を試みた．加工後の角断面溝を観察すると，溝の底面では多少チッピングが存在しているが，エッジ部分ではほぼ全面にチッピングが生じている．このエッジ部分のチッピング防止を図るため，送り速度を2mm/minから1mm/minに緩和して再度実験を行うことにした．さらに，加工法による相違を確認する目的でアップカットとダウンカットによる切削実験を行った．**図4.32**に実験結果の外観を示し，**図4.33**に角溝断面の模式図を示す．送り速度を1mm/minに変更したが，アップカット・ダウンカットともに溝のエッジ部分にチッピングが発生している．双方，溝底面にはチッピングは生じておらず，溝のエッジ部分と底面では加工メカニズムに相違があると考えられる．溝の底面は**図3.3**同様の加工メカニズムで切削されており，工具一刃当たりの送り量が臨界切込み深さdc値以下であれば延性モード切削となる．**図4.34**にチッピング発生のメカニズムの模式図を示す．溝の壁面部分では，アップカット時には下方から上方に向かって工具が通過し，ダウンカット時には上方から下方へ工具が通過する．壁面にも工具が通過する際には切削力が加わり，その方向は工具の通過方向となる．アップカットでは，壁面の下方から上方に切削力が加わる．同様に，ダウンカットでは上方から下方に切削力が加わる．これら切削力に加えて，摩擦力も同様の方向に加わっていると考える．これら切削力と摩擦力によって，アップカットでは壁面部分に引張応力が発生する．同様に，ダウンカットではエッジ近傍のガラス表面に引張応力が発生する．角断面溝のエッジ部分に発生するチッピングは上記のメカニズムによって発生したと考える．

工具のノーズRを利用した円弧溝の切削では，加工溝の深さは溝中心から連続的に0になる．エッジ部分と摩擦力を受ける壁面部分は存在せず，クラック発生の要因となる引張応力発生地点も存在しない．そのため，クラックの発生が低減していたものと考える．

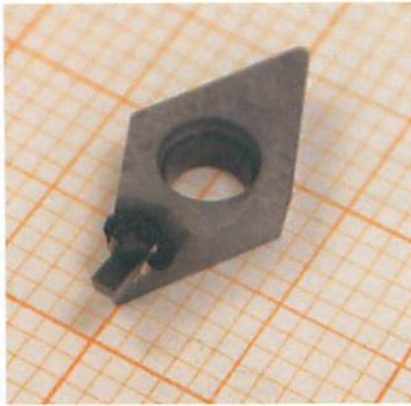



図 4.29　角断面溝加工用バインダレス cBN 工具

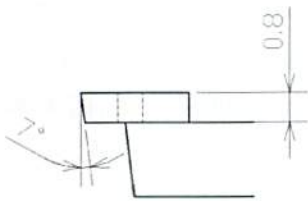
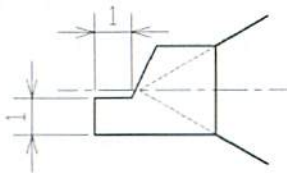



図 4.30　角断面溝加工用工具の形状

図 4.31　角断面溝加工の例(1)

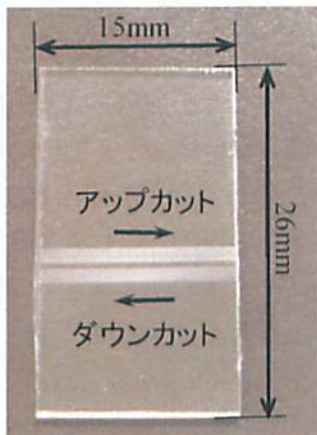



図 4.32　角断面溝加工の例(2)

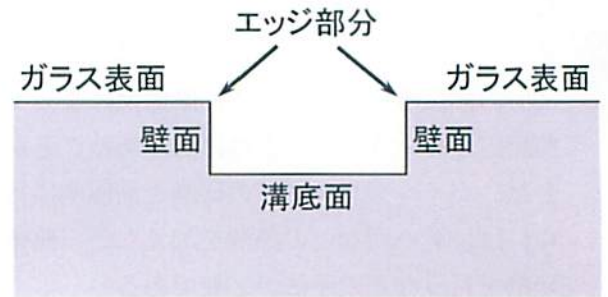



図 4.33　角断面溝の模式図

図 4.34　チッピング発生のメカニズム

アップカットとダウンカットのチッピング発生メカニズムを検証するため，加工溝の壁面およびエッジ部分を電子顕微鏡(SEM)で観察することにした．顕微鏡用スライドガラスをカットした試料(図 4.32 同様にアップカットとダウンカットを同条件で加工したもの)は，加工溝の壁面が観察可能となるように配慮した．SEM の試料台に垂直ではなく 45° 傾斜させる治具を用いて取り付けた．この試料の加工条件は，バインダレス cBN 矩形工具，主軸回転数 2,000min^{-1}，送り 2mm/min，極圧潤滑被膜剤塗布である．

アップカットの加工溝エッジ部分の SEM 像を図 4.35 に示す．この図の上半分は加工溝であり，下半分が未加工のガラス表面である．画像のほぼ中央に幅 100μm 弱の貝殻状クラックが観察できる．このクラックは加工溝の底面(下方)からガラス表面に向かって発生している．図 4.36 は，図 4.35 の貝殻状クラック部分の拡大像である．エッジ部分には，貝殻状クラック以外にも細かなチッピングが無数に存在していることが観察できる．

ダウンカットの加工溝エッジ部分の SEM 像を図 4.37 に示す．図 4.35 と同じ倍率であるが，クラックおよびチッピングは小さめである．アップカットと同様な貝殻状クラックが画像中央部に観察できる．図 4.38 はこのクラックの拡大像である．

ダウンカットにおいても，加工溝の底面(下方)からガラス表面に向かって発生しているクラックが観察できる．

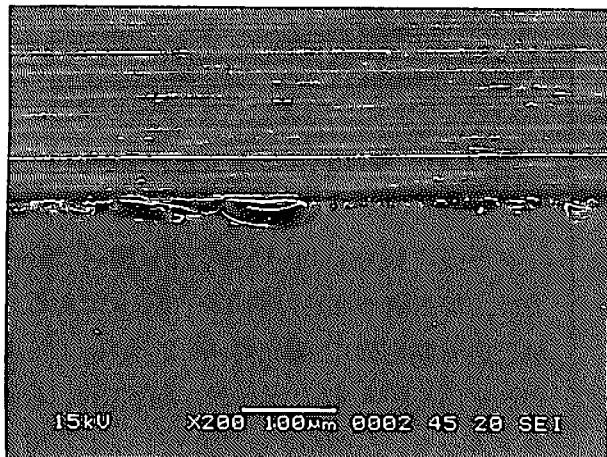



図 4.35　アップカットのエッジ部分 SEM 像

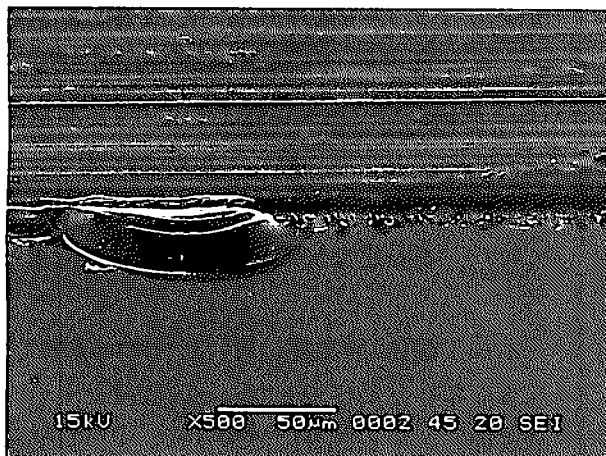



図 4.36　貝殻状クラックの拡大(アップカット)

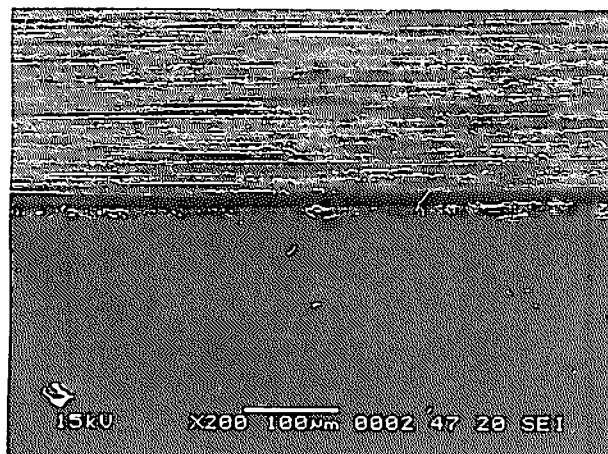



図 4.37　ダウンカットのエッジ部分 SEM 像

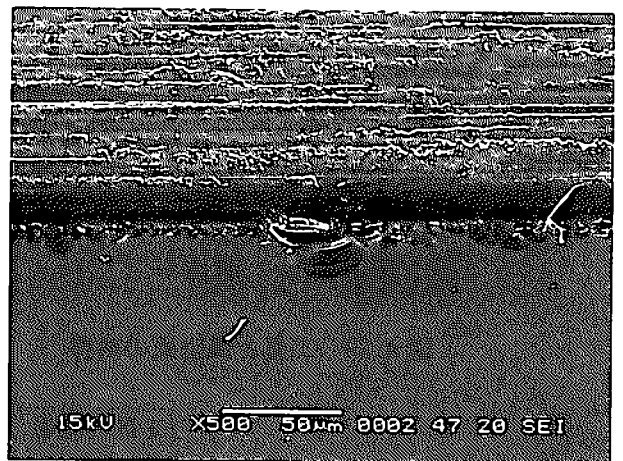



図 4.38　貝殻状クラックの拡大(ダウンカット)

図 4.34 に示すクラック・チッピング発生のメカニズムでは，溝底面から上方に向かう貝殻状クラックはダウンカットでは発生しない．しかし，図 4.37 以外にも多数の貝殻状クラックが SEM で観察された．以上より，図 4.34 のメカニズム以外にもクラック発生原因が存在することになる．ダウンカットにおいて，溝底面から上方に向かう力はどこで発生するのか検討した．矩形工具による溝加工では，溝幅と工具の幅は等しい．そのため，工具と溝壁面は接触し，摩擦力が発生する．図 4.39 に工具と溝壁面における摩擦発生の模式図を示す．エッジ部分の細かいチッピングは，上方から下方に向かう力によって発生していると考えられる．また，貝殻状クラックは，加工溝底面から上方に向かう力によって発生すると考えられる．図 4.39 では，アップカット，ダウンカット共に上方，下方への力が発生することになる．以上より，フライカットによる角断面溝の加工では，矩形工具を用いると溝壁面およびエッジ部分には容易にクラックが発生してしまうことが判明した．

クラック発生の要因として，切りくずの巻き込みも考えられる．工具すくい面で発生した切りくずは，刃先から刃元方向だけでなく壁面の方向にも広がると考えられる(図 4.40 参照)．また，切削油剤として用いている極圧潤滑被膜剤は粘度が高く，切りくずは潤滑剤内部に留まる．クラック，またはチッピングよるブロック状の切りくずが刃先によって加工溝の壁面に衝突する可能性もある．以上より，加工溝のエッジ部分に存在する貝殻状クラックは，摩擦力による引張応力だけでなく，

切りくずの巻き込みも発生原因と考える．

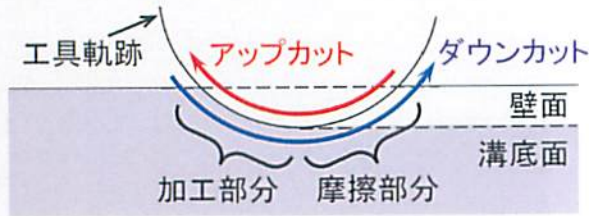



図 4. 39　工具と溝壁面の摩擦

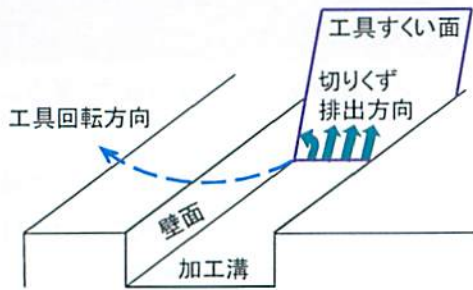



図 4. 40　切りくず排出方向

フライカットにおいて，加工溝のクラックを防止する工具形状は，先端から刃元に向かって細くなるテーパーが必要である．矩形および工具先端より刃元が細い形状の工具では，切りくずの巻き込みで加工溝の壁面にダメージを与えてしまう．工具形状にテーパーが施されていると，図 4.39 に示す摩擦部分で加工溝壁面と工具は接することがなくなる(図 4.41 参照)．工具と溝壁面に発生する間隔はテーパーの角度に依存し，間隔を t，工具の移動距離を d，テーパー角度を θ とすると，下式が成立する．

$$t = d\sin\frac{\theta}{2}$$

先端角が 60° の工具では，工具と壁壁面の間隔は移動距離の半分になる．

一般的な旋削用のスローアウェイチップには，工具先端に円弧(ノーズ R)加工が施されている．そのため，旋削用チップを用いたフライカットでは，ノーズ R がテーパーと同様の効果があるため，加工溝壁面と工具は接することなく摩擦力が発生していなかった．

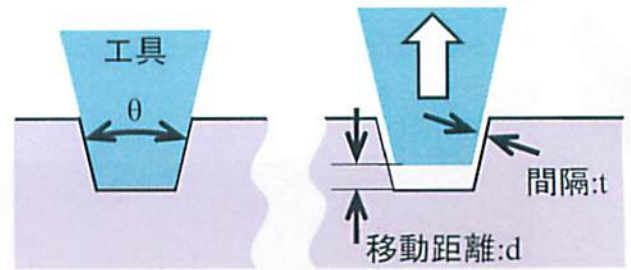



図 4. 41　テーパー付き工具と溝壁面との間隔

クラック観察に用いた加工例(図 4.35～4.38)では，加工溝の深さは約 12～14 μm である．非接触三次元測定機(三鷹光器 NH-3 改)による溝形状の測定例を図 4.42 に示す．この図では，右側がダウンカット，左側がアップカットによる加工溝の断面形状である．この図でアップカットとダウンカットを比較する．ダウンカットでは，設定切込み深さは同一だが 1 μm 程度深く加工されており，溝底面の起状の振幅が大きく，クラックが発生している部分を測定したと考えられる．表面粗さ(Ra)を測定した結果を表 4.1 に示す．測定箇所は溝の始点，中間点，終点であり，クラックを避けた．アップカットは表面粗さの測定値がばらついており，不安定な加工状態が反映した結果と考える．

本加工法(矩形工具を用いた角断面溝加工)による表面粗さは最良で 0.05 μmRa 程度である．また，溝底面，エッジ部分にはチッピング，貝殻状クラックが存在するため，加工面品位は低い．クラック発生の原因となる工具と加工溝の摩擦，切りくずの巻き込みは，本加工方法では避けることができない．以上の結果より，角断面溝の加工には矩形工具を使用したフライカットは適していないと判断できる．角断面溝の加工を行うためには，新たな手法で取り組む必要がある．

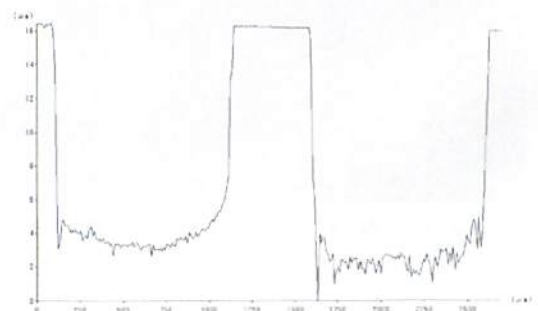



図 4. 42　角断面溝の断面形

表 4.1　加工溝底面の表面粗さ (Ra)　(μm)

	始点	中間地点	終点
アップカット	0.147	0.111	0.056
ダウンカット	0.048	0.053	0.052

5．おわりに

本研究では，「硬脆材料」を対象とする超精密加工技術の高度化を目指した加工実験を行った．対象とする硬脆材料にはガラスを選択し，加工方法は延性モード切削(フライカット)である．

フライカットによる延性モード切削では，加工面の品質向上を主眼に置いた加工実験中心の研究を行い，以下の結果を得た．

・切削温度の測定では，ファイバ式放射温度計へ石英ガラス製光ファイバを FC コネクタで接続し，その光ファイバを切削する手法を改良した．改良点は，光ファイバ固定へ紫外線硬化樹脂の利用と光ファイバの大径化である．

・エアタービンスピンドルを利用した光ファイバの研削，切削実験において，加工温度の測定に成功した．研削，切削による加工温度は，共に 1,250℃である．

・超精密旋盤によるフライカットにおいても，石英ガラス(光ファイバー)の切削温度測定に成功した．切削温度は最大で 865℃である．

・cBN の水熱分解を利用し，摩擦熱によるバインダレス c BN の研磨を試みた．しかし，cBN の熱伝導率が高く，摩擦熱が拡散して水熱分解の発生温度に至らなかった．そのため，研磨には成功しなかった．

・加工形状が工具輪郭形状となるフライカットの特徴を生かし，先端を矩形に成形したバインダレス cBN 工具を用いてソーダ石灰ガラスに角断面溝を加工した．

・矩形工具による角断面溝の加工では，溝のエッジ部分に多くのチッピングが発生した．この原因は，切削力および工具と加工溝に発生する摩擦力が引き起こす引張応力と切りくずの巻き込みであると考える．

・角断面溝の加工は矩形工具を使用したフライカットには適しておらず，新たな手法で取り組む必要がある．

謝　辞

本研究は，財団法人ＪＫＡの競輪補助金を受けて実施したものであり，ご支援いただいた関係各位に深く感謝いたします．

参考文献等

1) GfK ジャパン㈱ホームページ：http://www.gfkjpn.co.jp/index.html
2) ㈱BCN ホームページ：http://bcnranking.jp/
3) パナソニック㈱ホームページ：http://panasonic.jp/support/dsc/knowhow/knowhow18.html
4) 飯塚保：加工技術高度化に関する研究，平成 21 年度製造業の基盤的技術の拡充強化に関する研究等補助事業，KSK-GH21-3,2010
5) 草壁克己，外輪健一郎：マイクロリアクタ入門，米田出版，2008，pp7-8
6) 葛生　伸：石英ガラスの世界，工業調査会，1995,pp.13-14
7) 作花済夫：トコトンやさしいガラスの本，日刊工業新聞，2004,pp.1-15
8) 作花済夫：ガラス科学の基礎と応用，内田老鶴圃，1997, pp. 1-4
9) R.Brehm et al.,"Transparent single-point turning of optical glass:A phenomenological presentation" Precision Engineering,1979,Volume 1,Issue 4, pp. 207-213 turning of optical glass:A phenomenolog ical presentation" Precision Engineering,1979, Volume 1,Issue 4,pp.207-213
10) Masakazu Miyashita "Ductile Mode Grinding Technology for Brittle Materials –The way to Nano Technology" Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 1991,56-5, pp.782-787
11) Hiroshi Hashimoto et al.," Shear-mode Grinding of Brittle Materials and Evaluating Ground Surfaces" Journal of the Japan Society of Precision Engineering,1993,59(3), pp. 455-460
12) K.E.Puttick et al.,"Single-point diamond

machining of Glasses"Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 426, 1989, pp. 19-30

13)Moriwaki Toshimichi et al, "Ultraprecision ductile cutting of glass by applying ultrasonic vibration" Annals of CIRP, 1992, Vol.41/1,pp. 141-144

14)Masahiko Yoshino et al, "Ductile Mode Machining of Hard-Brittle Materials Under High Hydrostatic Pressure"(2nd Report) – Machining Test of Hard-Brittle Materials under High Hydrostatic Pressure" Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 2002, Vol.68, No.10, pp.1351-1355

15)Ogura Ichiro et al, "Ductile-Regime Machining of Optical Glasses by Means " Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 2000,Vol.66, No.9, pp.1431-1435

16)Y.Takeuchi et al., "Ultraprecision 3D Micromachining of Glass" Annals of CIRP, 1996, Vol.45/1,pp.401-404

17)Takashi Matsumura et al., "A Study on Cutting Force in the Milling Process of Glass" Transactions of NAMRI/SME, 2004, Vol.32, pp.463-470

18)Takashi Matsumura et al., "Glass Machining with Ball End Mill" Transactions of NAMRI/SME, 2005, Vol.33, pp.319-326

19)飯塚　保，上野　滋，森田　昇：ガラス切削が可能な超精密旋盤の開発，型技術ワークショップ 2009in 金沢講演論文集，A-7

20)J.France, J.W.Roblee, K.Modemann :Dynamaic characteristics of the Lawrence Livermore National Laboratory Precision Engineering Research Lath, PRECISION ENGINERING, 13, 3 (1991) 196

21)(社)砥粒加工学会 編：砥粒加工技術のすべて 工学調査会，2006，pp.151-152

22)ダイヤモンド工業会編:ダイヤモンド技術総覧，エヌジーティー，2007，105

23)比田井洋史，戸倉　和：レーザ照射による水熱反応を利用したセラミックスの加工，精密工学会誌，2001，Vol67,No9,pp.1448-1452

24)住友電工ハードメタル㈱HP：スミボロン/スミダイヤ製品ガイド No.028, http://www.sumitool.com/news/common/BD_28.pdf

25)バウデン・テイバー:固体の摩擦と潤滑，丸善，1978,46

26)東ソークォーツ㈱HP，石英ガラスの特性データ・熱的特性：http://www.tqgj.co.jp/th.html

27) ダイヤモンド工業協会編：ダイヤモンド技術総覧，NGT 出版，2007,124

研 究 報 告 書

KSK-GH22-3

加工技術高度化に関する研究

— ガラス加工用バインダレスcBNの成形 —

平成23年3月31日発行

発行者　財団法人　機械振興協会　技術研究所
(〒203-0042)　東京都東久留米市八幡町一丁目1番12号
電話　042-475-1155(代表)

印刷所　有限会社　清和印刷
(〒162-0041)　東京都新宿区早稲田鶴巻町574
電話　03-5225-7366